



ФИЗИКА



ФИЗИКА



УЧЕБНИК

Допущено
Министерством просвещения
Российской Федерации

2-е издание, стереотипное

Москва
«Просвещение»
2022

УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721
Ф50



Авторы: И. М. Перышкин, Е. М. Гутник, А. И. Иванов, М. А. Петрова

Учебник допущен к использованию при реализации имеющих государственную аккредитацию образовательных программ начального общего, основного общего, среднего общего образования организациями, осуществляющими образовательную деятельность, в соответствии с Приказом Министерства просвещения Российской Федерации № 766 от 23.12.2020.


Эксперты, осуществлявшие экспертизу учебника:
Репина И. В., Цыганкова П. В., Васильева И. В., Жиганова А. В.

Издание выходит в pdf-формате.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Ответ на вопросы  ; обсуди с товарищами  ;

реши задачи из  УПРАЖНЕНИЯ ;

примени полученные знания  ЗАДАНИЕ :



— экспериментальное,



— исследовательское,



— проектное,




— графическое;

расширь свой кругозор  Это любопытно... ;

научись пользоваться приборами

ЛАБОРАТОРНЫЕ
РАБОТЫ

Материал для учащихся, интересующихся физикой,
отмечен знаком .

Физика : 9-й класс : учебник : издание в pdf-формате / И. М. Перышкин, Е. М. Гутник, А. И. Иванов, М. А. Петрова. — 2-е изд., стер. — Москва : Просвещение, 2022. — 351, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-09-101324-5 (электр. изд.). — Текст : электронный.
ISBN 978-5-09-092689-8 (печ. изд.).

Учебник соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту основного общего образования.

Большое количество красочных иллюстраций, разнообразные вопросы и задания, а также дополнительные сведения и любопытные факты способствуют эффективному усвоению учебного материала.

УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721

ISBN 978-5-09-101324-5 (электр. изд.)
ISBN 978-5-09-092689-8 (печ. изд.)

© АО «Издательство «Просвещение», 2021
© Художественное оформление.
АО «Издательство «Просвещение», 2021
Все права защищены

Глава 1

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ

§ 1

МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА. СИСТЕМА ОТСЧЁТА

В окружающем нас мире всё находится в непрерывном движении. Под движением в общем смысле этого слова подразумевают любые изменения, происходящие в природе. Наиболее простым видом движения является *механическое движение*.

Из курса физики 7 класса вы знаете, что *механическим движением тела называют изменение его положения в пространстве относительно других тел, происходящее с течением времени*.

При решении различных научных и практических задач, связанных с механическим движением тел, нужно уметь описывать это движение, т. е. определять скорость, пройденный путь, положение тела и некоторые другие характеристики движения для любого момента времени.

Например, запуская летательный аппарат с Земли на другую планету, учёные должны предварительно рассчитать, где будет находиться эта планета относительно Земли в момент посадки на неё аппарата. А для этого необходимо выяснить, как меняются с течением времени направление и модуль скорости этой планеты и по какой траектории она движется.

Основной задачей механики является определение положения тела в любой момент времени. Одно и то же движение, рассматриваемое относительно разных тел, будет описы-



Механическое
движение
воздушного шара

ваться по-разному. Представим себе пассажира, сидящего в вагоне движущегося поезда. Относительно попутчика, сидящего напротив, он неподвижен. Относительно стрелочника и машиниста встречного поезда — движется, причём с разной скоростью.

Таким образом, желая определить, движется ли тело и как оно движется, мы должны указать тело, относительно которого рассматривается движение, — *тело отсчёта*.

Из курса математики вы знаете, что положение точки можно задать с помощью координат. Если точка движется прямолинейно, достаточно связать с телом отсчёта одну координатную ось, направленную вдоль линии движения (рис. 1, а). При этом положение точки определяется одной координатой. Если точка движется в пределах плоскости, её положение однозначно задаётся двумя координатами. В этом случае с телом отсчёта связывают две взаимно перпендикулярные координатные оси (рис. 1, б). Если же необходимо описать движение точки в пространстве, вводят трёхмерную систему координат (рис. 1, в). Но как задать положение тела, имеющего размеры? Ведь каждая точка этого тела будет иметь свою собственную координату.

Оказывается, во многих случаях вместо движения реального тела можно рассматривать движение так называемой *материальной точки*, т. е. точки, обладающей массой этого тела.

Для материальной точки можно однозначно определить координату, скорость и другие физические величины, так как она не имеет размеров.

Материальных точек нет в природе, это модель, использование которой упрощает решение многих задач и при этом позволяет получить достаточно точные результаты. Метод моделирования мы применяли и ранее, например, изучая оптические явления, мы использовали модели точечного источника света и луча.

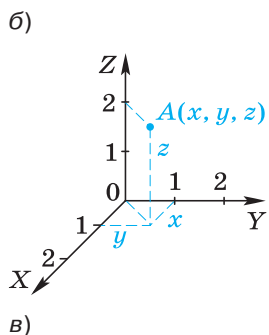
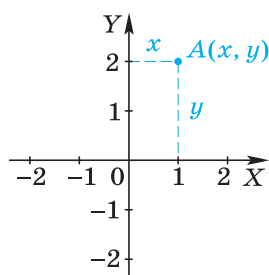
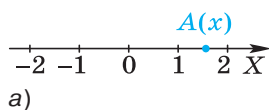


Рис. 1. Положение точки можно задать с помощью координатной прямой или прямоугольной системы координат



Материальными точками считают планеты при изучении их движения вокруг Солнца

Тело можно считать материальной точкой в тех случаях, когда его размерами можно пренебречь, поскольку они несущественны в условиях решаемой задачи.

Практически всякое тело можно рассматривать как материальную точку в тех случаях, когда расстояния, проходимые телом, очень велики по сравнению с его размерами.

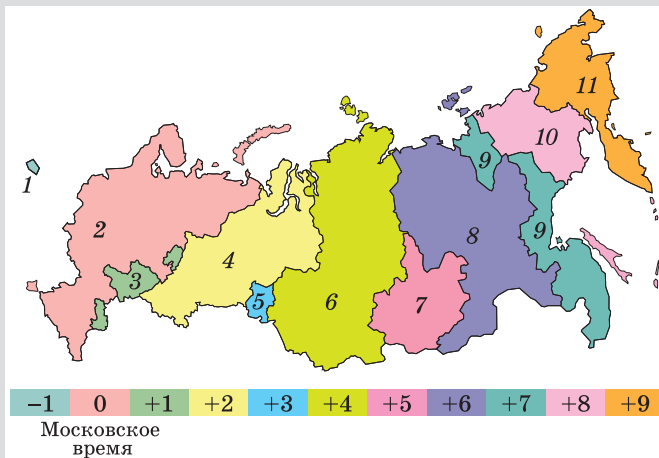
Например, материальной точкой считают Землю при изучении её движения вокруг Солнца. В данном случае различия в движении разных точек планеты, вызванные её суточным вращением, не влияют на величины, описывающие годовое движение.

В других условиях к тому же телу нельзя применять модель материальной точки.

Так, при решении задач, связанных с суточным вращением Земли (например, при определении времени восхода солнца в разных местах поверхности земного шара), считать планету материальной точкой нельзя, так как результат задачи зависит от размеров планеты и скорости движения точек её поверхности. Например, во Владивостокской часовой зоне солнце взойдёт на 2 ч позже, в Иркутской — на 4 ч поз-

Часовые зоны России:

- 1** — Калининградская (−1);
- 2** — Московская (0);
- 3** — Самарская (+1);
- 4** — Екатеринбургская (+2);
- 5** — Омская (+3);
- 6** — Красноярская (+4);
- 7** — Иркутская (+5);
- 8** — Якутская (+6);
- 9** — Владивостокская (+7);
- 10** — Магаданская (+8);
- 11** — Камчатская (+9)





За материальную точку можно принять самолёт, летящий из одного города в другой

же, а в Московской — на 9 ч позже, чем в Камчатской.

За материальную точку правомерно принять самолёт, если требуется, например, определить среднюю скорость его движения на пути из Москвы в Новосибирск. Но при вычислении силы сопротивления воздуха, действующей на летящий самолёт, считать его материальной точкой нельзя, поскольку сила сопротивления зависит от формы и скорости движения самолёта.

Тело, движущееся поступательно¹, можно принимать за материальную точку даже в том случае, если его размеры соизмеримы с прохо-

димыми им расстояниями. Например, поступательно движется человек, стоящий на ступеньке движущегося эскалатора (рис. 2, а). В любой момент времени все точки тела человека движутся одинаково. Поэтому если мы хотим описать движение человека, то достаточно рассмотреть движение только одной его точки. При этом решение задачи значительно упрощается.

Рассмотрим движение тележки с капельницей. Положение тележки (рис. 2, б), движущейся по столу прямолинейно и поступательно, можно определить с помощью линейки, расположенной вдоль траектории дви-

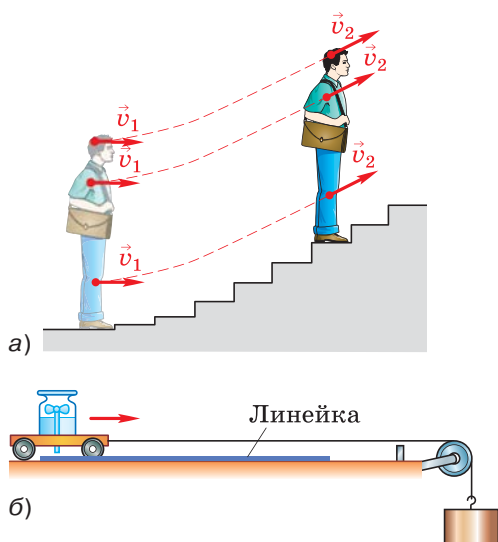
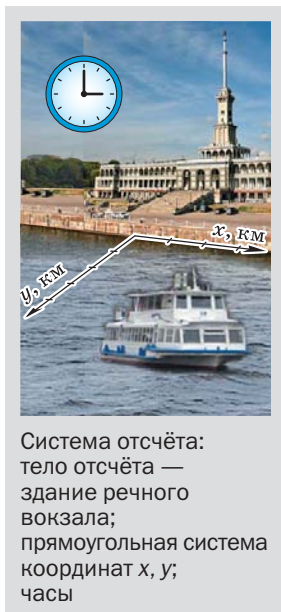


Рис. 2. При поступательном движении тела все его точки движется одинаково

¹ Поступательное движение — движение тела, при котором прямая, соединяющая любые две точки этого тела, перемещается, оставаясь всё время параллельной своему первоначальному направлению. Поступательным может быть как прямолинейное, так и криволинейное движение. Например, поступательно движется кабина колеса обозрения, ящик, выдвигаемый из стола.



жения (тележка с капельницей принимается за материальную точку). Линейку в этом опыте удобно принять за тело отсчёта, а её шкала может служить координатной осью. Положение тележки с капельницей будет определяться относительно нулевого деления линейки — *начала отсчёта*.

Однако для описания движения тележки не достаточно просто фиксировать её положение в пространстве, необходимо определять положение *в зависимости от времени*. Это значит, что помимо линейки понадобится прибор для измерения времени — **часы**.

В данном случае роль такого прибора выполняет капельница, из которой через равные промежутки времени падают капли. Поворачивая кран, можно добиться того, чтобы капли падали с интервалом, например, в 1 с. Посчитав число промежутков между следами капель на линейке, можно определить соответствующий промежуток времени.

Из приведённых примеров следует, что для определения положения движущегося тела в любой момент времени необходимы тело отсчёта, связанная с ним система координат и прибор для измерения времени.

Система координат, тело отсчёта, с которым она связана, и прибор для измерения времени образуют систему отсчёта, относительно которой рассматривается движение тела.

Конечно, во многих случаях нельзя непосредственно измерить координаты движущегося тела в любой момент времени. У нас нет реальной возможности, например, расположить измерительную ленту и расставить наблюдателей с часами вдоль многокилометрового пути движущегося автомобиля, плывущего по океану лайнера, летящего самолёта, снаряда, вылетевшего из артиллерийского орудия, различ-

ных небесных тел, движение которых мы наблюдаем, и т. д.

Тем не менее знание законов физики позволяет определить координаты тел, движущихся в различных системах отсчёта, в частности в системе отсчёта, связанной с Землёй.



- 1.** В чём заключается основная задача механики? **2.** С какой целью используется понятие «материальная точка»? **3.** В каких случаях к движущемуся телу можно применить модель материальной точки? **4.** Приведите пример, показывающий, что одно и то же тело в одной ситуации можно считать материальной точкой, а в другой — нет. **5.** В каком случае положение движущегося тела можно задать с помощью одной координатной оси? **6.** Что такое система отсчёта?

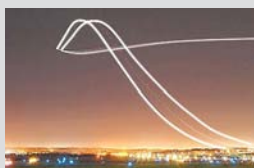


Мимо стоящего автомобиля проезжает колонна велосипедистов, движущихся примерно с равной скоростью. Двигается ли каждый из велосипедистов относительно автомобиля? Двигается ли каждый велосипедист относительно соседнего велосипедиста? Двигается ли автомобиль относительно велосипедиста?



УПРАЖНЕНИЕ 1

1. Можно ли считать автомобиль материальной точкой при определении пути, который он прошёл за 2 ч, двигаясь со средней скоростью, равной 80 км/ч; при обгоне им другого автомобиля?
2. Самолёт совершает перелёт из Москвы во Владивосток. Может ли рассматривать самолёт как материальную точку диспетчер, наблюдающий за его движением; пассажир этого самолёта?
3. Когда говорят о скорости машины, поезда и других транспортных средств, тело отсчёта обычно не указывают. Что подразумевают в этом случае под телом отсчёта?
4. Мальчик стоял на земле и наблюдал, как его младшая сестра каталась на карусели. После катания девочка сказала брату, что и он сам, и дома, и деревья быстро проносились мимо неё. Мальчик же стал утверждать, что он вместе с домами и деревьями был неподвижен, а двигалась сестра. Относительно каких тел отсчёта рассматривали движение девочка и мальчик? Объясните, кто прав в споре.
5. Относительно какого тела отсчёта рассматривают движение, когда говорят: а) скорость ветра равна 5 м/с; б) бревно плывёт по течению реки, поэтому его скорость равна нулю; в) скорость плывущего по реке дерева равна скорости течения воды в реке; г) любая точка колеса движущегося велосипеда описывает окружность; д) солнце утром восходит на востоке, в течение дня движется по небу, а вечером заходит на западе?



За время взлёта самолёт проходит путь, равный длине траектории его движения от земли до верхней точки

До сих пор при решении многих задач, связанных с движением различных тел, мы пользовались физической величиной, называемой «путь». Под путём подразумевалась сумма длин всех участков траектории, пройденных телом за рассматриваемый промежуток времени.

Путь — *скалярная величина* (т. е. величина, не имеющая направления).

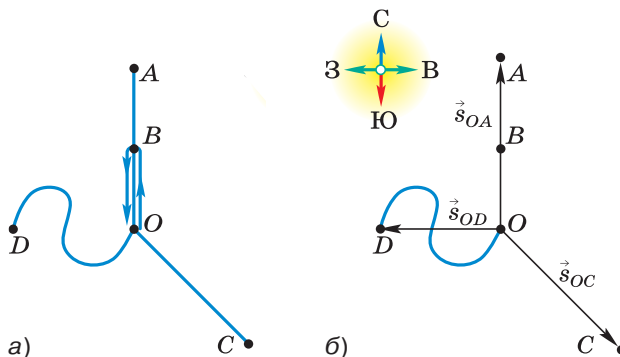
Для решения различных практических задач в разных сферах деятельности (например, в диспетчерской службе наземного и воздушного транспорта, в космонавтике, астрономии и др.) необходимо уметь рассчитывать положение тела в заданный момент времени.

Покажем, что не всегда можно решить такую задачу, даже зная, какой путь прошло тело за данный промежуток времени. Для этого обратимся к рисунку 3, а.

Допустим, нам известно, что некоторое тело (материальная точка) начинает двигаться из точки O и за 1 ч проходит путь, равный 20 км.

Для ответа на вопрос, где будет находиться это тело спустя 1 ч после его выхода из точки O , у нас не хватает информации о направлении его движения. Тело могло, двигаясь прямолинейно в северном направлении, попасть в точку A , находящуюся на расстоянии 20 км

Рис. 3. Знание пройденного телом пути не является достаточным для определения конечного положения тела



от точки O . Могло, дойдя до точки B , находящейся на расстоянии 10 км от точки O , повернуть на юг и вернуться в точку O . При заданном значении пути тело также могло оказаться и в точке C , если бы оно двигалось прямолинейно на юго-восток, и в точке D , если бы его движение происходило по изображённой криволинейной траектории.

Чтобы избежать такой неопределённости, для нахождения положения тела в пространстве в заданный момент времени вводят физическую величину, называемую *перемещением*.

Перемещением тела (материальной точки) называют вектор, соединяющий начальное положение тела с его последующим положением.

Согласно определению перемещение — *векторная величина* (т. е. величина, имеющая направление). Оно обозначается \vec{s} , т. е. той же буквой, что и путь, только со стрелкой над ней. Как и путь, в СИ¹ модуль перемещения измеряется в *метрах*. Для измерения модуля перемещения используются и другие единицы длины, например километры, мили и т. д.

На рисунке 3, б показаны векторы перемещений, которые совершило бы тело, если бы прошло 20 км следующим образом: по прямолинейной траектории OA в северном направлении (вектор \vec{s}_{OA}), по прямолинейной траектории OC в юго-восточном направлении (вектор \vec{s}_{OC}) и по криволинейной траектории OD (вектор \vec{s}_{OD}). А если бы тело прошло 20 км, дойдя до точки B и вернувшись обратно в точку O , то в этом случае вектор его перемещения был бы равен нулю.

¹ Напомним, что в СИ (Международная система единиц) единицей массы является килограмм (кг), длины — метр (м), времени — секунда (с). Их называют *основными*, так как они выбраны независимо от единиц других величин. Единицы, определяемые через основные, называют *производными*. Примерами производных единиц СИ являются единицы скорости (м/с), плотности (кг/м³) и многие другие.

Зная начальное положение и вектор перемещения тела, т. е. его направление и модуль, можно однозначно определить, где это тело находится. Например, если известно, что вектор перемещения тела, вышедшего из точки O , направлен на север, а его модуль равен 20 км, то мы с уверенностью можем утверждать, что тело находится в точке A (см. рис. 3, б).

Таким образом, на чертеже можно найти конечное положение тела, отложив от его начального положения вектор перемещения.



1. Всегда ли можно определить положение тела в заданный момент времени t , зная начальное положение этого тела (при $t_0 = 0$) и путь, пройденный им за промежуток времени t ? Ответ подтвердите примерами.
2. Что называют перемещением тела (материальной точки)?
3. Можно ли однозначно определить положение тела в заданный момент времени t , зная начальное положение этого тела и вектор перемещения, совершённого телом за промежуток времени t ? Ответ подтвердите примерами.



УПРАЖНЕНИЕ 2

1. Какую физическую величину определяет водитель автомобиля по показаниям одометра — пройденный путь или модуль перемещения?
2. Как должен двигаться автомобиль в течение некоторого промежутка времени, чтобы по одометру можно было определить модуль перемещения, совершённого автомобилем за этот промежуток времени?
3. Турист прошёл 2 км строго на север, затем 3 км на восток и 2 км на юг. Сделайте чертёж, выбрав масштаб: в двух клетках 0,5 км, и найдите путь, пройденный телом и перемещение тела.

§ 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТЫ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТЕЛА

Зная начальное положение тела и его перемещение за некоторый промежуток времени, можно графически найти положение тела. Но в большинстве случаев необходимо *вычислить* положение тела, т. е. определить его координаты.

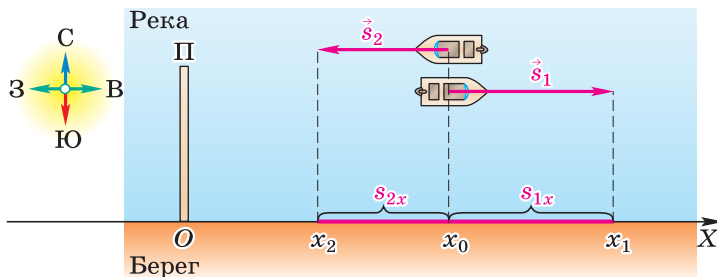


Рис. 4. Определение координаты движущегося тела

Покажем, как определить координату движущегося тела, зная координату его начального положения и вектор перемещения. Для этого решим задачу.

Два катера идут по реке в противоположных направлениях и встречаются в 100 км к востоку от пристани П (рис. 4). Продолжая движение, за некоторый промежуток времени t первый катер переместился от места встречи на 60 км к востоку, а второй — на 50 км к западу. Определите координаты каждого катера относительно пристани и расстояние между катерами через промежуток времени t после их встречи.

Так как катера движутся поступательно, можно считать их материальными точками.

Проведём координатную ось OX параллельно прямой, вдоль которой движутся катера, и направим её на восток. Начало этой оси ($x = 0$) — точку O — совместим с пристанью, приняв её за тело отсчёта (поскольку в задаче требуется определить положение катеров по отношению к пристани).

Опустим перпендикуляры от начала и конца векторов перемещения \vec{s}_1 и \vec{s}_2 на ось OX , получим отрезки s_{1x} и s_{2x} , которые являются *проекциями указанных векторов*¹. Проекция вектора на ось считается положительной, если вектор сонаправлен с этой осью, и отрицатель-

¹ Такое действие называют проецированием.

ной, если вектор направлен противоположно оси.

Значит, в данном случае $s_{1x} > 0$, а $s_{2x} < 0$.

Из рисунка 4 видно, что координаты x_1 и x_2 можно найти следующим образом:

$$x_1 = x_0 + s_{1x}, \quad (1)$$

$$x_2 = x_0 + s_{2x}. \quad (2)$$

Расстояние l между двумя точками, как известно, равно модулю разности их координат:

$$l = |x_1 - x_2|. \quad (3)$$

По уравнениям (1) и (2) можно рассчитать искомые координаты x_1 и x_2 . Но какие числа следует подставить в уравнения (1) и (2) вместо символов x_0 , s_{1x} и s_{2x} ?

Согласно условию задачи катера встретились на расстоянии 100 км от пристани, значит, длина отрезка Ox_0 равна 100 км. Из рисунка 4 видно, что координата x_0 находится на положительной полуоси OX , т. е. $x_0 > 0$. Значит, $x_0 = 100$ км.

Поскольку ось OX параллельна векторам перемещений катеров, длины проекций s_{1x} и s_{2x} равны соответственно длинам векторов \vec{s}_1 и \vec{s}_2 (как противоположные стороны построенных на них прямоугольников). А это означает, что *модуль* каждой проекции равен *модулю* соответствующего ей вектора.

Указанные в задаче расстояния (60 км и 50 км), на которые сместились катера за время t , представляют собой *модули векторов их перемещений*. Значит, модуль проекции s_{1x} равен 60 км, а модуль проекции s_{2x} равен 50 км.

Поскольку проекция s_{1x} положительна, то можно записать: $s_{1x} = 60$ км. Но проекция s_{2x} отрицательна, поэтому $s_{2x} = -50$ км.

Теперь запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$$x_0 = 100 \text{ км}$$

$$s_{1x} = 60 \text{ км}$$

$$s_{2x} = -50 \text{ км}$$

$$x_1 = ?$$

$$x_2 = ?$$

$$l = ?$$

Решение:

Координаты каждого катера и расстояние между ними:

$$x_1 = x_0 + s_{1x},$$

$$x_2 = x_0 + s_{2x},$$

$$l = |x_1 - x_2|.$$

$$x_1 = 100 \text{ км} + 60 \text{ км} = 160 \text{ км},$$

$$x_2 = 100 \text{ км} - 50 \text{ км} = 50 \text{ км},$$

$$l = |160 \text{ км} - 50 \text{ км}| = 110 \text{ км}.$$

Ответ: $x_1 = 160 \text{ км}$, $x_2 = 50 \text{ км}$, $l = 110 \text{ км}$.

Мы получили формулу, которая позволяет определить координату тела, если известны его координата в начальный момент времени и проекция вектора перемещения.

$$x = x_0 + s_x$$

$$x = x_0 + s_x.$$



1. При каком условии проекция вектора на ось будет положительной, а при каком — отрицательной? **2.** Запишите уравнение, с помощью которого можно определить координату тела, зная координату его начального положения и проекцию вектора перемещения.



УПРАЖНЕНИЕ 3

- 1.** Мотоциклист, переехав через мост, движется по прямолинейному участку дороги. У светофора, находящегося на расстоянии 10 км от моста, мотоциклист встречает велосипедиста. За 0,1 ч с момента встречи мотоциклист перемещается на 6 км, а велосипедист — на 2 км от светофора (при этом оба они продолжают двигаться прямолинейно в противоположных направлениях).

Определите координаты мотоциклиста и велосипедиста и расстояние между ними спустя 0,1 ч после их встречи.

Указание: начертите ось X , направив её в сторону движения мотоциклиста и приняв за тело отсчёта мост. Обозначьте координату светофора (x_c), координаты велосипедиста (x_b) и мотоциклиста (x_m), которые они имели через 0,1 ч после встречи. Над осью начертите и обозначьте векторы перемещений велосипедиста (\vec{s}_b) и мотоциклиста (\vec{s}_m), а на оси — проекции этих векторов (s_{bx} и s_{mx}).

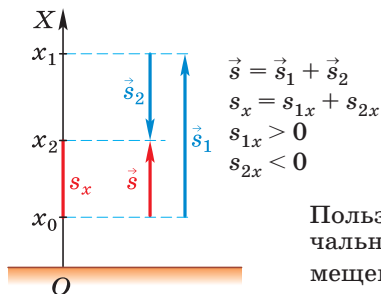


Рис. 5

2. Мальчик держит в руках мяч на высоте 1 м от поверхности земли. Затем он подбрасывает мяч вертикально вверх. За некоторый промежуток времени t мяч успевает подняться на 2,4 м от своего первоначального положения, достигнув при этом точки наибольшего подъёма, и опуститься от этой точки на 1,25 м.

Пользуясь рисунком 5, определите: а) координату x_0 начального положения мяча; б) проекцию s_x вектора перемещения \vec{s} , совершённого мячом за время t ; в) координату x_2 , которую имел мяч через промежуток времени t после броска.

3. Тело, начав движение из точки A с координатами $x_A = 2$ м, $y_A = 3$ м, переместилось в точку B с координатами $x_B = 2$ м, $y_B = -2$ м, затем в точку C с координатами $x_C = -1$ м, $y_C = -2$ м, и закончило движение в точке D с координатами $x_D = -1$ м, $y_D = 3$ м. Сделайте чертёж, выбрав масштаб: в двух клетках 1 м. Найдите проекции перемещения на оси координат и модули перемещения на участках AB , BC , CD , и модуль результирующего перемещения тела.

§ 4

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

Во всех рассмотренных нами примерах и задачах по определению координат тела вектор перемещения был известен (т. е. были известны его модуль и направление).

А как найти вектор перемещения, если он не задан?

Проще всего получить формулу для определения вектора перемещения для тела, движущегося прямолинейно и *равномерно* (т. е. совершающего за любые равные промежутки времени равные перемещения).

Согласно определению,

скорость равномерного прямолинейного движения — это постоянная векторная величина, равная отношению перемещения тела за любой промежуток времени к значению этого промежутка.

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}. \quad (1)$$

Из формулы (1) можно найти перемещение для прямолинейного равномерного движения, если известна скорость движения тела:

$$\vec{s} = \vec{v}t. \quad (2)$$

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$$

По уравнениям, записанным в векторной форме, можно судить о том, как векторные величины направлены по отношению друг к другу. Например, формулы (1) и (2) свидетельствуют о том, что при прямолинейном равномерном движении векторы скорости и перемещения направлены в одну и ту же сторону.

Для расчёта перемещения применяют формулу, в которую входят проекции векторов на ось:

$$s_x = v_x t. \quad (3)$$

Тогда формулу для определения координаты тела в любой момент времени можно записать так:

$$x = x_0 + v_x t.$$

Мы получили зависимость координаты от времени — *уравнение движения* тела. Зависимость $x(t)$ может быть выражена не только алгебраически, но и графически.

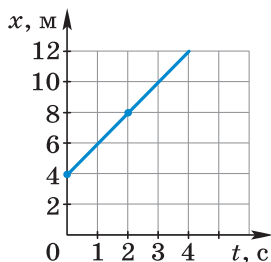
$$x = x_0 + v_x t$$

Из курса математики нам известна линейная функция $y = kx + b$, где x — аргумент, k — постоянный коэффициент, b — свободный член. Графиком этой функции является прямая.

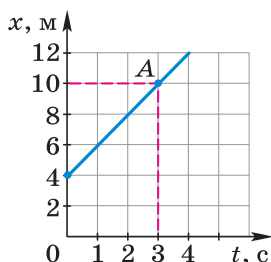
Функция $x = x_0 + v_x t$ (или $x = v_x t + x_0$) тоже линейная с аргументом t , постоянным коэффициентом v_x и свободным членом x_0 . Значит, её график — прямая.

Построим для примера график зависимости координаты от времени для тела, движущегося равномерно прямолинейно в положительном направлении оси X со скоростью 2 м/с, из точки с координатой 4 м. Поскольку скорость тела сонаправлена с осью X , проекция скорости на эту ось будет положительна.

Запишем уравнение движения для данного случая: $x = 4 + 2t$ (м).



а)



б)

Рис. 6. График функции $x = 4 + 2t$ (м)

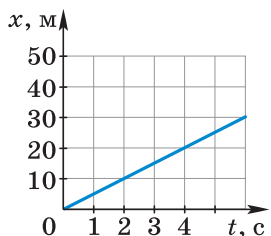


Рис. 7

Для построения прямой достаточно знать координаты двух точек. Например, при $t = 0$ $x = 4$ м, при $t = 2$ с $x = 8$ м. Отметим точки на координатной плоскости и проведём через них прямую (рис. 6, а). График зависимости $x(t)$ называют *графиком движения*.

По графику, как и по формуле, можно найти положение тела в любой момент времени. Найдём координату тела через 3 с после начала движения. Для этого из точки с координатой 3 по оси времени (рис. 6, б) восставим перпендикуляр до пересечения с графиком (точка А). Из точки А опустим перпендикуляр на ось x и найдём, что через 3 с после начала движения координата тела будет 10 м.

Пример. Тело движется прямолинейно. Пользуясь графиком зависимости $x(t)$ (рис. 7), охарактеризуйте движение тела и составьте уравнение его движения.

Решение. Из графика движения следует, что тело движется равномерно в положительном направлении оси X . Для того чтобы составить уравнение движения тела, нужно определить его начальную координату и проекцию скорости. Начальная координата тела (при $t = 0$) $x_0 = 0$.

Поскольку тело движется в положительном направлении оси X , проекция скорости $v_x > 0$. Выберем произвольный момент времени, например 2 с, и, определив проекцию совершенного за это время перемещения, рассчитаем проекцию скорости:

$$v_x = \frac{10 \text{ м}}{2 \text{ с}} = 5 \text{ м/с}.$$

Запишем уравнение движения в общем виде $x = x_0 + v_x t$.

С учётом данных, полученных при анализе графика, уравнение примет вид:

$$x = 5t \text{ (м)}.$$

Ответ: $x = 5t$ (м).

По знаку проекции можно судить о том, как направлен соответствующий ей вектор по отношению к выбранной оси. Но если при решении задачи на прямолинейное движение нас не интересует направление векторов перемещения и скорости, то можно воспользоваться формулой, в которую входят их модули:

$$s = vt. \quad (4)$$

Формула (4) вам давно знакома — вы часто использовали её при решении задач по физике и математике. Только под буквой s подразумевался пройденный телом путь. Почему же теперь мы говорим, что s — это модуль вектора перемещения?

Дело в том, что *при прямолинейном движении в одном направлении модуль вектора перемещения, совершённого телом за некоторый промежуток времени, равен пути, пройденному этим телом за тот же промежуток времени.*

Наряду с графиком движения используют и график модуля вектора скорости.

На рисунке 8 представлен график зависимости *модуля вектора скорости v от времени t* при равномерном движении тела. По графику зависимости $v(t)$ можно определить модуль перемещения s за некоторый промежуток времени. Действительно, модуль вектора перемещения s , совершённого телом, движущимся прямолинейно и равномерно, за промежуток времени t_1 , определяется по формуле:

$$s = v_1 t_1.$$

Произведению $v_1 t_1$ равна также и площадь S закрашенного прямоугольника (см. рис. 8), так как отрезки v_1 и t_1 (или, что то же самое, Ov_1 и Ot_1) являются смежными сторонами этого прямоугольника.

Таким образом, *при прямолинейном равномерном движении тела модуль вектора его перемещения численно равен площади прямоугольника, заключённого между графиком*

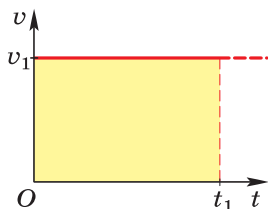


Рис. 8. Определение модуля вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно равномерно

скорости, осью Ot и перпендикулярами к этой оси, восставленными из точек, соответствующих моментам начала и конца наблюдения (в данном случае из точек O и t_1). Часто эту площадь называют площадью под графиком скорости.

Поскольку при решении многих задач придётся иметь дело не только с модулями, но и с проекциями векторов, рассмотрим график зависимости проекции вектора скорости от времени.

Для этого обратимся ещё раз к задаче с двумя катерами (см. § 3, рис. 4). Пусть промежуток времени t , за который катера совершили указанные перемещения, равен 2 ч. За 2 ч первый катер переместился на 60 км, а второй — на 50 км. Значит, модуль вектора скорости первого катера равен 30 км/ч, а второго — 25 км/ч.

Так как проекции векторов скорости и перемещения первого катера положительны, а второго — отрицательны, то $v_{1x} = 30$ км/ч, $s_{1x} = 60$ км, а $v_{2x} = -25$ км/ч, $s_{2x} = -50$ км.

Графики зависимости проекций скоростей катеров от времени представлены на рисунке 9. Модули проекций перемещений численно равны площадям закрашенных прямоугольников.

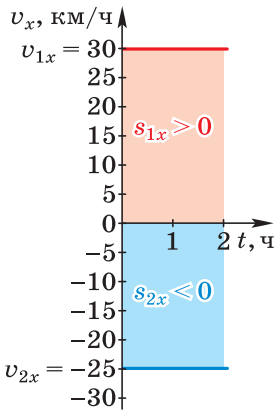


Рис. 9. Графики зависимости проекций скоростей катеров от времени



1. Что называют скоростью равномерного прямолинейного движения?
2. Как найти проекцию вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равномерно, если известны проекция вектора скорости и время движения?
3. При каком условии модуль вектора перемещения, совершённого телом за некоторый промежуток времени, равен пути, пройденному телом за тот же промежуток времени?
4. Может ли модуль вектора перемещения быть меньше пути, пройденного за тот же промежуток времени? Приведите примеры.
5. Какую информацию о движении двух тел можно получить по графикам, изображённым на рисунке 9?
6. Является ли движение тела прямолинейным равномерным, если за любые равные промежутки времени оно проходит одинаковые пути?



Два мотоцикла движутся прямолинейно и равномерно. Скорость движения первого мотоцикла больше скорости движения второго. Чем будут отличаться их графики зависимости: а) путей от времени; б) скоростей от времени?



УПРАЖНЕНИЕ 4

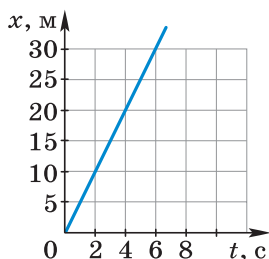


Рис. 10

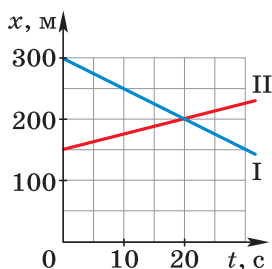


Рис. 11

1. Тело движется вдоль оси X . Определите по графику движения (рис. 10) путь, пройденный телом за 5 с, и скорость движения тела. Запишите уравнение движения тела.
2. Охарактеризуйте движение тел, графики движения которых представлены на рисунке 11. По графикам определите начальные координаты тел, направление движения тел, проекции скоростей. Что означает точка пересечения графиков? Напишите уравнение движения для каждого тела.
3. Может ли график зависимости модуля вектора скорости от времени располагаться под осью Ot (т. е. в области отрицательных значений оси скорости)?
4. Постройте графики зависимости проекций векторов скорости от времени для трёх автомобилей, движущихся прямолинейно и равномерно, если два из них едут в одном направлении, а третий — навстречу им. Скорость первого автомобиля равна 60 км/ч, второго — 80 км/ч, а третьего — 90 км/ч.
5. Координата тела, движущегося прямолинейно и равномерно, изменяется по закону $x = 6 + 3t$ (м). Постройте графики зависимости от времени координаты и пути. Сравните полученные графики.

§ 5

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. УСКОРЕНИЕ

Равномерное движение встречается в жизни довольно редко. Как правило, за равные промежутки времени тело проходит разные пути. Движение тела в этом случае является *неравномерным*.

Из всех видов неравномерного движения мы будем изучать самое простое — *прямолинейное равноускоренное*, при котором тело движется вдоль прямой линии, а проекция вектора скорости тела за любые равные промежутки времени меняется одинаково (при этом модуль вектора скорости может как увеличиваться, так и уменьшаться).



Самолёт, равноускоренно разгоняющийся по взлётной полосе

Например, если скорость движущегося по взлётной полосе самолёта за любые 10 с увеличивается на 15 м/с, за любые 5 с — на 7,5 м/с, в каждую секунду — на 1,5 м/с и т. д., то самолёт движется равноускоренно.

В данном случае под скоростью движения самолёта подразумевается его так называемая **мгновенная скорость**, т. е. *скорость в каждой конкретной точке траектории в соответствующий момент времени*.

Мгновенная скорость равна отношению малого перемещения к малому промежутку времени, за который это перемещение совершается. Промежуток времени должен быть столь малым, что движение можно считать практически равномерным (дальнейшее его уменьшение не будет приводить к заметным изменениям скорости).

Мгновенная скорость тел, движущихся равноускоренно, может меняться по-разному: в одних случаях быстрее, в других — медленнее. Например, скорость обычного пассажирского лифта средней мощности за каждую секунду разгона увеличивается на 0,4 м/с, а скоростного — на 1,2 м/с. В таких случаях говорят, что тела движутся с разным *ускорением*. Можно сказать, что ускорение характеризует быстроту изменения скорости.

Дадим определение физической величине, называемой ускорением.

Пусть скорость некоторого тела, движущегося равноускоренно, за промежуток времени t изменилась от \vec{v}_0 до \vec{v} . Под \vec{v}_0 подразумевается начальная скорость тела, т. е. скорость в момент $t_0 = 0$, принятый за начало отсчёта времени. А \vec{v} — это скорость, которую тело имело к концу промежутка времени t , отсчитываемого от $t_0 = 0$. Тогда за каждую единицу времени вектор скорости менялся на величину, равную $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$. Это отношение обозначают символом \vec{a} и называют **ускорением**.

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Ускорением тела при равноускоренном движении называют векторную физическую величину, равную отношению изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло.

Равноускоренное движение — это движение с постоянным ускорением.

Как векторная величина ускорение характеризуется не только модулем, но и направлением. Модуль вектора ускорения показывает, на сколько меняется модуль вектора скорости в каждую единицу времени. Чем больше ускорение, тем быстрее меняется скорость тела.

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

За единицу ускорения в СИ принимается такое постоянное ускорение, при котором за 1 с скорость тела изменяется на 1 м/с.

$$\frac{1 \text{ м/с}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ м/с}^2.$$

Таким образом, в СИ единицей ускорения является *метр на секунду в квадрате (м/с²)*.

Применяют и другие единицы ускорения, например 1 см/с².

Вычислить ускорение тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, можно с помощью следующего уравнения, в которое входят проекции векторов ускорения и скорости:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}.$$

Покажем на конкретных примерах, как находится ускорение.

Санки, которые равноускоренно скатываются с горы (рис. 12, а), участок пути АВ прошли за 4 с. При этом в точке А они имели скорость, равную 0,4 м/с, а в точке В — скорость, равную 2 м/с (так как санки движутся поступательно, можно принять их за материальную точку).

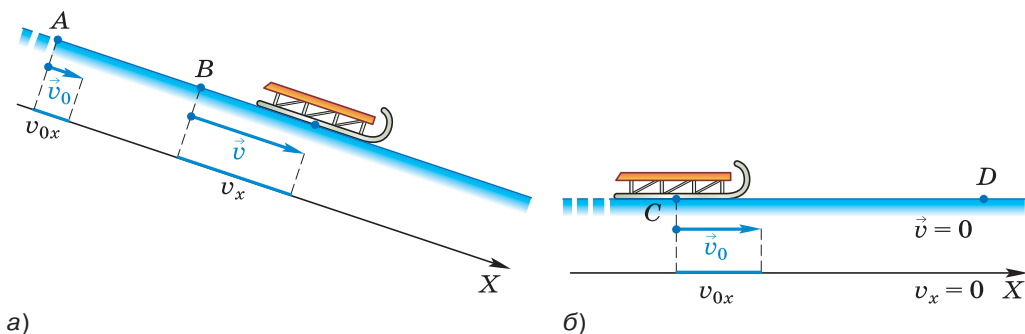


Рис. 12. Равноускоренное движение санок, скатывающихся с горы (AB) и продолжающих движение по равнине (CD)

Определим, с каким ускорением двигались санки на участке AB.

За начало отсчёта времени следует принять момент прохождения санками точки A, поскольку согласно условию именно от этого момента отсчитывается промежуток времени, за который модуль вектора скорости изменился от 0,4 до 2 м/с.

Проведём ось X, параллельную вектору скорости движения санок и направленную в ту же сторону. Найдём проекции векторов \vec{v}_0 и \vec{v} на ось X. Обе эти проекции положительны и равны модулям соответствующих векторов: $v_{0x} = 0,4$ м/с, $v_x = 2$ м/с.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$$v_{0x} = 0,4 \text{ м/с}$$

$$v_x = 2 \text{ м/с}$$

$$t = 4 \text{ с}$$

$$a_x = ?$$

Решение:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t},$$

$$a_x = \frac{2 \text{ м/с} - 0,4 \text{ м/с}}{4 \text{ с}} =$$

$$= 0,4 \frac{\text{м/с}}{\text{с}} = 0,4 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $a_x = 0,4 \text{ м/с}^2$.

Проекция вектора ускорения на ось X получилась положительной, значит, вектор ускорения сонаправлен с осью X и со скоростью движения санок.

Если векторы скорости и ускорения направлены в одну сторону, то скорость растёт.

Теперь рассмотрим пример, в котором санки, скатившись с горы, движутся по горизонтальному участку CD и останавливаются в точке D (рис. 12, б).

Известно, что в точке C санки имели скорость $1,2$ м/с, а участок CD был пройден ими за 6 с.

Рассчитаем ускорение санок, т. е. определим, на сколько менялась скорость санок за каждую единицу времени.

Началом отсчёта времени будем считать момент, когда санки проходят точку C . Тогда модуль вектора начальной скорости равен $1,2$ м/с, а конечной — нулю.

Проведём ось X параллельно отрезку CD и сонаправим её со скоростью движения санок, как показано на рисунке 12, б. При этом проекция вектора скорости санок на ось X в любой момент их движения будет положительна и равна модулю вектора скорости. В частности, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 1,2$ м/с, а при $t = 6$ с $v_x = 0$.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$$v_{0x} = 1,2 \text{ м/с}$$

$$v_x = 0$$

$$t = 6 \text{ с}$$

$$a_x = ?$$

Решение:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t},$$

$$a_x = \frac{0 - 1,2 \text{ м/с}}{6 \text{ с}} = -0,2 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $a_x = -0,2 \text{ м/с}^2$.

Проекция ускорения на ось X отрицательна. Это значит, что вектор ускорения \vec{a} направлен противоположно оси X и соответственно противоположно скорости движения. При этом скорость санок уменьшается.

Таким образом, если векторы скорости и ускорения движущегося тела направлены в одну сторону, то модуль вектора скорости тела увеличивается, а если в противоположные — уменьшается.

Мы познакомились с ускорением при равноускоренном движении. Однако понятие ускорения шире. Каким бы сложным ни было движение, говорят об ускорении тела в каждой точке траектории в каждый момент времени. При этом под ускорением (иногда его называют *мгновенным ускорением*) понимают отношение изменения скорости к *малому* промежутку времени, за который это изменение произошло. При равноускоренном движении мгновенное ускорение во всех точках траектории одинаково.



1. К какому виду движения — равномерному или неравномерному — относится прямолинейное равноускоренное движение? **2.** Что понимают под мгновенной скоростью неравномерного движения? **3.** Дайте определение ускорения равноускоренного движения. Какова единица ускорения? **4.** Что такое равноускоренное движение? **5.** Что показывает модуль вектора ускорения? **6.** При каком условии модуль вектора скорости движущегося тела увеличивается; уменьшается?



В каком случае мгновенная и средняя скорости равны между собой? Ответ поясните.



УПРАЖНЕНИЕ 5

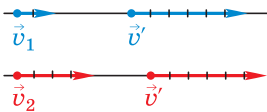


Рис. 13

- 1.** За один и тот же промежуток времени t модуль вектора скорости первого автомобиля изменился от v_1 до v' , а второго — от v_2 до v' (векторы скорости изображены в одинаковом масштабе на рисунке 13). Какой из автомобилей двигался в указанный промежуток с большим ускорением?
- 2.** Самолёт, разгоняясь перед взлётом, в течение некоторого промежутка времени двигался равноускоренно. Каково было при этом ускорение самолёта, если за 30 с его скорость возросла от 10 до 55 м/с?
- 3.** С каким ускорением двигался поезд на некотором участке пути, если за 12 с его скорость возросла на 6 м/с?
- 4.** Тело, имеющее начальную скорость 20 м/с, движется с постоянным ускорением и останавливается через 10 с после начала движения. Чему равно ускорение тела?
- 5.** Шайба после удара клюшкой движется с начальной скоростью 10 м/с по льду. Лёд уже не гладкий и шайба тормозит с ускорением 2 м/с². Через какое время после удара шайба остановится?

Нам известно, что при равноускоренном движении вектор ускорения и скорость тела связывает формула:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Выразим из этой формулы скорость \vec{v} , которую имело тело к концу промежутка времени t , отсчитываемого от момента начала наблюдения, т. е. от $t_0 = 0$:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.$$

Эта формула позволяет найти скорость тела в любой момент времени, если известна начальная скорость и ускорение тела.

Если в начальный момент тело покоилось, т. е. $\vec{v}_0 = 0$, то последняя формула примет вид:

$$\vec{v} = \vec{a}t.$$

Запишем полученные формулы через проекции векторных величин на ось X :

$$v_x = v_{0x} + a_x t, \quad v_x = a_x t.$$

Зависимость проекции вектора скорости от времени при равноускоренном движении линейная, значит, графиком функции $v_x(t)$ будет прямая.

Построим, например, график зависимости от времени проекции вектора скорости разгоняющегося перед взлётом самолёта, который движется из состояния покоя прямолинейно с ускорением $1,5 \text{ м/с}^2$ в течение 40 с .

Сонаправим ось X со скоростью движения самолёта. Тогда проекции векторов скорости и ускорения будут положительны.

Запишем закон изменения скорости $v_x = 1,5t \text{ (м/с)}$.

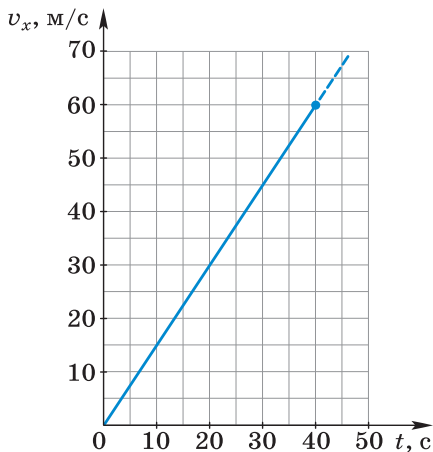


Рис. 14. График функции $v_x = 1,5t$ (м/с)

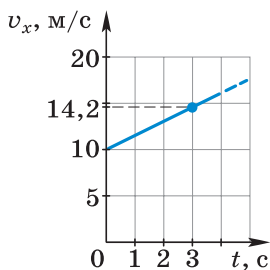


Рис. 15. График функции $v_x = 10 + 1,4t$ (м/с)

Для построения заданной прямой достаточно знать координаты (т. е. t и v_x) двух любых её точек.

Например, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 0$; при $t = 40$ с $v_x = 1,5 \text{ м/с}^2 \cdot 40 \text{ с} = 60 \text{ м/с}$. По координатам первой из найденных точек видно, что график зависимости скорости от времени пройдёт через начало координат (рис. 14).

Теперь построим аналогичный график для случая, когда начальная скорость не равна нулю.

По дороге едет автомобиль со скоростью 10 м/с (36 км/ч). Водитель автомобиля, увидев дорожный знак, снимающий ограничение скорости, нажал на педаль газа, в результате чего автомобиль стал двигаться с постоянным ускорением $1,4 \text{ м/с}^2$. Построим график зависимости от времени проекции вектора мгновенной скорости на ось X , сонаправленную со скоростью прямолинейно движущегося автомобиля, для первых четырёх секунд разгона.

Поскольку движение автомобиля равноускоренное, зависимость $v_x(t)$ описывается формулой $v_x = 10 + 1,4t$ (м/с). Найдём по этой формуле координаты двух произвольных точек графика. Например, при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 10 \text{ м/с}$; при $t = 3$ с $v_x = 10 \text{ м/с} + 1,4 \text{ м/с}^2 \cdot 3 \text{ с} = 14,2 \text{ м/с}$.

График, построенный по этим точкам, представлен на рисунке 15. Он отсекает на оси v_x отрезок, равный проекции вектора начальной скорости.

Построим теперь график зависимости проекции вектора скорости от времени, если начальная скорость не равна нулю, а модуль вектора скорости уменьшается с течением времени.

Допустим, водитель автомобиля, движущегося со скоростью 20 м/с (72 км/ч), нажимает на педаль тормоза. В результате автомобиль движется с ускорением 2 м/с^2 и через 10 с останавливается.

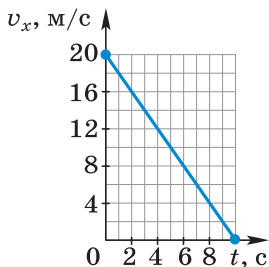


Рис. 16. График функции $v_x = 20 - 2t$ (м/с)

Ось X сонаправим с вектором скорости. За начало отсчёта времени примем момент начала торможения, когда скорость автомобиля ещё была равна 20 м/с. В этом случае координаты двух точек графика очевидны:

при $t_0 = 0$ $v_{0x} = 20$ м/с;

при $t = 10$ с $v_x = 0$.

Закон изменения скорости $v_x = 20 - 2t$ (м/с). Соответствующий график представлен на рисунке 16.



1. Запишите формулу, по которой можно рассчитать проекцию вектора мгновенной скорости прямолинейного равноускоренного движения, если известны: а) проекция вектора начальной скорости и проекция вектора ускорения; б) проекция вектора ускорения при том, что начальная скорость равна нулю.
2. Что представляет собой график проекции вектора скорости равноускоренного движения при начальной скорости: а) равной нулю; б) не равной нулю?
3. Чем сходны и чем отличаются друг от друга движения, графики которых представлены на рисунках 15 и 16?



УПРАЖНЕНИЕ 6

1. Хоккеист слегка ударил клюшкой по шайбе, придав ей скорость 2 м/с. Чему будет равна скорость шайбы через 4 с после удара, если в результате трения о лёд она движется с ускорением 0,25 м/с²?
2. Лыжник съезжает с горы из состояния покоя с ускорением, равным 0,2 м/с². Через какой промежуток времени его скорость возрастет до 2 м/с?
3. В одних и тех же координатных осях постройте графики проекции вектора скорости при прямолинейном равноускоренном движении для случаев: а) $v_{0x} = 1$ м/с, $a_x = 0,5$ м/с²; б) $v_{0x} = 1$ м/с, $a_x = 1$ м/с²; в) $v_{0x} = 2$ м/с, $a_x = 1$ м/с².

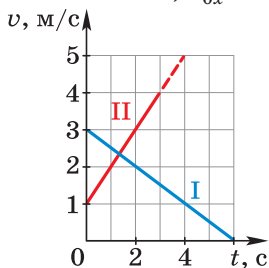


Рис. 17

Масштаб: 1 см — 1 м/с; 1 см — 1 с.

4. В одних и тех же координатных осях постройте графики проекции вектора скорости при прямолинейном равноускоренном движении для случаев: а) $v_{0x} = 4,5$ м/с, $a_x = -1,5$ м/с²; б) $v_{0x} = 3$ м/с, $a_x = -1$ м/с².
5. На рисунке 17 представлены графики зависимости модуля вектора скорости от времени при прямолинейном движении двух тел. С каким по модулю ускорением движется тело I; тело II? Запишите формулу

изменения скорости для каждого тела. Постройте в одних и тех же координатных осях графики зависимости $a_x(t)$ (ось X считайте сонаправленной с вектором начальной скорости тела I).

§ 7

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Выведем формулу, с помощью которой можно рассчитать проекцию вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, за любой промежуток времени. Для этого обратимся к рисунку 18. Как на рисунке 18, *а*, так и на рисунке 18, *б* отрезок AC представляет собой график проекции вектора скорости тела, движущегося с постоянным ускорением a (при начальной скорости v_0).

Мы знаем, что при прямолинейном *равномерном* движении тела проекция вектора перемещения численно равна площади прямоугольника, заключённого под графиком проекции вектора скорости (см. рис. 9).

Покажем, что и в случае прямолинейного *равноускоренного* движения проекция вектора перемещения s_x численно равна площади фигуры под графиком скорости. Для этого на оси Ot (см. рис. 18, *а*) выделим малый промежуток времени db . Из точек d и b проведём перпенди-

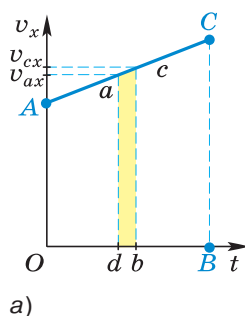
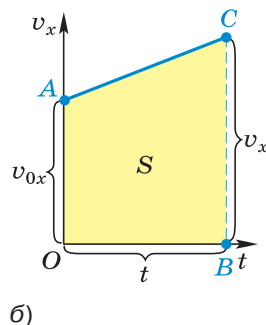


Рис. 18. Проекция вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно и равноускоренно, численно равна площади S под графиком



куляры к оси Ot до их пересечения с графиком проекции вектора скорости в точках a и c . Таким образом, за промежуток времени, соответствующий отрезку db , скорость тела меняется от v_{ax} до v_{cx} .

Промежуток времени db должен быть настолько мал, чтобы проекция вектора скорости менялась очень незначительно. Тогда движение тела в течение этого промежутка времени мало отличается от равномерного.

В этом случае участок ac графика можно считать горизонтальным, а полоску $acbd$ — прямоугольником. Значит, площадь этой полоски численно равна проекции вектора перемещения за промежуток времени, соответствующий отрезку db .

На такие полоски можно разбить всю фигуру $OACB$, являющуюся трапецией. Её площадь будет равна сумме площадей прямоугольных полосок. Следовательно, *проекция вектора перемещения s_x за промежуток времени, соответствующий отрезку OB , численно равна площади S трапеции $OACB$.*

Из курса геометрии нам известно, что площадь трапеции равна произведению полусуммы её оснований на высоту. Из рисунка 18, б видно, что основаниями трапеции $OACB$ являются отрезки $OA = v_{0x}$ и $BC = v_x$, а высотой — отрезок $OB = t$. Следовательно,

$$S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t.$$

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

Поскольку $v_x = v_{0x} + a_x t$, а $S = s_x$, то можно записать:

$$s_x = \frac{v_{0x} + v_{0x} + a_x t}{2} \cdot t = \frac{2v_{0x}t + a_x t^2}{2} = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2},$$

или

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Таким образом, мы получили формулу для расчёта проекции вектора перемещения при прямолинейном равноускоренном движении.

По этой же формуле рассчитывают проекцию вектора перемещения и при движении тела с уменьшающейся по модулю скоростью, только в этом случае векторы скорости и ускорения будут направлены в противоположные стороны, поэтому их проекции будут иметь разные знаки.

Запишем уравнение движения $x = x_0 + s_x$ для тела, движущегося прямолинейно равноускоренно:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Для того чтобы определить положение тела в любой момент времени, необходимо знать начальные условия (начальную координату и начальную скорость) и ускорение тела.



- 1.** Пользуясь рисунком 18, а, докажите, что проекция вектора перемещения при прямолинейном равноускоренном движении численно равна площади фигуры $OACB$. **2.** Запишите уравнения для определения проекции вектора перемещения и координаты тела при его прямолинейном равноускоренном движении.



УПРАЖНЕНИЕ 7

- 1.** Велосипедист съехал с горки за 5 с, двигаясь с постоянным ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Определите длину горки, если в начале спуска скорость велосипедиста была равна 18 км/ч .
- 2.** Поезд, идущий со скоростью 15 м/с , остановился через 20 с после начала торможения. Считая, что торможение происходило с постоянным ускорением, определите перемещение поезда за 20 с.
- 3*1.** Приведите формулу $S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ к виду $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$. При необходимости воспользуйтесь указаниями в ответах.
- 4.** Постройте график зависимости $v_x(t)$ для тела, движущегося равноускоренно в положительном направлении оси X с возрастающей по модулю скоростью. Начальная скорость движения равна 1 м/с и ускорение — $0,5 \text{ м/с}^2$. Какой путь прошло тело за 4 с?

¹ Звёздочкой обозначены задачи повышенной сложности.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РАВНОУСКОРЕННОМ ДВИЖЕНИИ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Рассмотрим, как рассчитывается проекция вектора перемещения тела, движущегося прямолинейно равноускоренно, если его начальная скорость \vec{v}_0 равна нулю. В этом случае уравнение

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

будет выглядеть так:

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}.$$

Перепишем это уравнение, подставив в него вместо проекций s_x и a_x модули s и a векторов перемещения и ускорения. Поскольку в данном случае векторы \vec{s} и \vec{a} направлены в одну сторону, их проекции имеют одинаковые знаки. Поэтому уравнение для модулей векторов можно записать:

$$s = \frac{at^2}{2}.$$

Из этой формулы следует, что при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости модуль вектора перемещения прямо пропорционален квадрату промежутка времени, в течение которого это перемещение было совершено. Это означает, что при увеличении в n раз времени движения (отсчитываемого от момента начала движения) перемещение увеличивается в n^2 раз.

Например, если за произвольный промежуток времени t_1 от начала движения тело совершило перемещение $s_1 = \frac{a}{2}t_1^2$, то за промежуток времени $t_2 = 2t_1$ (отсчитываемый от того же момента, что и t_1) оно совершит перемещение $s_2 = \frac{a}{2} \cdot 4t_1^2 = 4s_1$; за промежуток времени

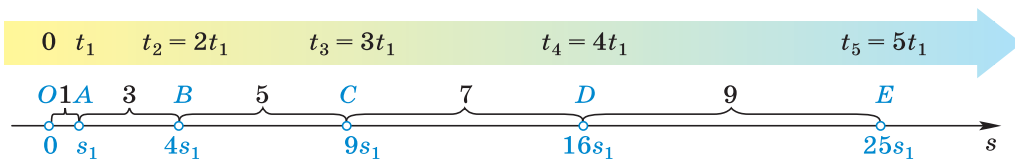


Рис. 19. Закономерности прямолинейного равноускоренного движения:
 $OA : OB : OC : OD : OE = 1 : 4 : 9 : 16 : 25$; $OA : AB : BC : CD : DE = 1 : 3 : 5 : 7 : 9$

$t_3 = 3t_1$ — перемещение $s_3 = \frac{a}{2} \cdot 9t_1^2 = 9s_1$, за промежуток времени $t_n = nt_1$ — перемещение $s_n = n^2s_1$ (где n — натуральное число).

Эта зависимость модуля вектора перемещения от времени при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости наглядно отражена на рисунке 19, где отрезки OA , OB , OC , OD и OE представляют собой модули векторов перемещений (s_1 , s_2 , s_3 , s_4 и s_5), совершённых телом соответственно за промежутки времени t_1 , $t_2 = 2t_1$, $t_3 = 3t_1$, $t_4 = 4t_1$ и $t_5 = 5t_1$.

На рисунке 19 показано, что

$$OA : OB : OC : OD : OE = 1 : 4 : 9 : 16 : 25, \quad (1)$$

т. е. при увеличении промежутков времени, отсчитываемых от начала движения, в целое число раз по сравнению с t_1 , модули соответствующих векторов перемещений возрастают как ряд квадратов последовательных натуральных чисел.

Рисунок 19 иллюстрирует ещё одну закономерность:

$$OA : AB : BC : CD : DE = 1 : 3 : 5 : 7 : 9, \quad (2)$$

т. е. модули векторов перемещений, совершаемых телом за последовательные равные промежутки времени (каждый из которых равен t_1), относятся как ряд последовательных нечётных чисел.

Закономерности (1) и (2) являются следствием того факта, что модуль перемещения пропорционален квадрату времени. Поэтому они

обязательно выполняются, если тело движется равноускоренно без начальной скорости.

Впервые равноускоренное движение было исследовано итальянским учёным *Галилео Галилеем* (1564—1642). Галилей установил закономерности (1) и (2) и экспериментально показал, что движение шарика по гладкому наклонному жёлобу является равноускоренным.



1. По каким формулам рассчитываются проекция и модуль вектора перемещения тела при его равноускоренном движении из состояния покоя?
2. Во сколько раз увеличится модуль вектора перемещения тела при увеличении времени его движения из состояния покоя в n раз?
3. Запишите, как относятся друг к другу модули векторов перемещений тела, движущегося равноускоренно из состояния покоя, при увеличении времени его движения в целое число раз по сравнению с t_1 .
4. Запишите, как относятся друг к другу модули векторов перемещений, совершаемых телом за последовательные равные промежутки времени, если это тело движется равноускоренно из состояния покоя.
5. С какой целью можно использовать закономерности (1) и (2)?



УПРАЖНЕНИЕ 8

1. Отходящий от станции поезд в течение первых 20 с движется прямолинейно и равноускоренно. Известно, что за третью секунду от начала движения поезд прошёл 2 м. Определите модуль вектора перемещения, совершённого поездом за первую секунду, и модуль вектора ускорения, с которым он двигался.
2. Шарик, скатываясь по наклонному жёлобу равноускоренно, за 5 с прошёл 75 см. Найдите ускорение шарика.
3. Поезд метрополитена разгоняется с ускорением 1 м/с^2 . Через какое время после отхода от станции скорость поезда достигнет предельной — 75 км/ч ? Какой путь пройдёт поезд за это время?
- 4*. Автомобиль, двигаясь равноускоренно из состояния покоя, за пятую секунду разгона проходит 6,3 м. Какую скорость развил автомобиль к концу пятой секунды от начала движения?



ЗАДАНИЕ



- Экспериментальная установка, которой пользовался Галилей, такова. Вдоль деревянной доски прорезан прямой канал, оклеенный изнутри полированным пергаментом. По каналу скользил гладкий бронзовый шарик. Угол наклона доски можно было менять. Для измерения времени Галилей использовал ведро с водой, в дне которого было проделано маленькое отверстие. Вода, вылившаяся из отверстия за время соскальзывания шарика, взвешивалась на точных весах.

«Повторяя опыты сотни раз, мы постоянно находили, что отношение пройденных путей равно отношению квадратов времени их прохождения» — так описывал Галилей выводы из экспериментов.

Спланируйте и проведите опыт, аналогичный опыту Галилея. Проверьте, выполняются ли закономерности (1) и (2).

§ 9

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

В курсе физики 7 класса упоминалось об относительности механического движения. Рассмотрим этот вопрос более подробно на примерах и сформулируем, в чём конкретно заключается относительность движения.

Человек идёт по вагону против движения поезда (рис. 20). Скорость поезда относительно поверхности земли равна 20 м/с, а скорость человека относительно вагона равна 1 м/с. Определим, с какой скоростью и в каком направлении движется человек относительно поверхности земли.

Будем рассуждать так. Если бы человек не шёл по вагону, то за 1 с он переместился бы вместе с поездом на расстояние, равное 20 м. Но за это же время он прошёл расстояние, равное 1 м, против хода поезда. Поэтому за время, равное 1 с, он сместился относительно поверхности земли только на 19 м в направлении движения поезда. Значит, скорость человека относительно поверхности земли равна 19 м/с и направлена в ту же сторону, что и скорость поезда. Таким образом, в системе от-

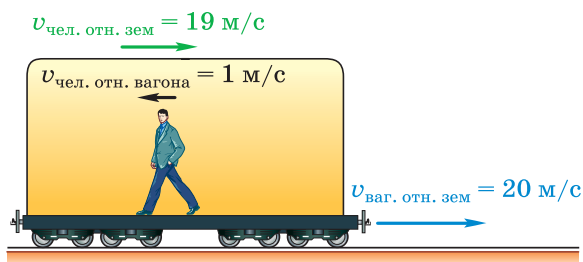


Рис. 20. Скорость движения человека относительно вагона и относительно земли различна по модулю и направлению

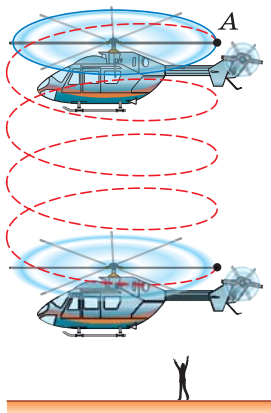


Рис. 21. Относительность траектории и пути

счёта, связанной с поездом, человек движется со скоростью 1 м/с , а в системе отсчёта, связанной с каким-либо телом на поверхности земли, — со скоростью 19 м/с , причём направлены эти скорости в противоположные стороны. Отсюда следует, что *скорость относительна*, т. е. *скорость одного и того же тела в разных системах отсчёта может быть различной как по числовому значению, так и по направлению*.

Теперь обратимся к другому примеру. Представьте вертолёт, вертикально опускающийся на землю. Относительно вертолёта любая точка винта, например точка А (рис. 21), будет всё время двигаться по окружности, которая на рисунке изображена сплошной линией. Для наблюдателя, находящегося на земле, та же самая точка будет двигаться по винтовой траектории (штриховая линия). Из этого примера ясно, что *траектория движения тоже относительна*, т. е. *траектория движения одного и того же тела может быть различной в разных системах отсчёта*.

Следовательно, *путь является величиной относительной*, так как он равен сумме длин всех участков траектории, пройденных телом

Вращение звёздного неба в течение ночи



за рассматриваемый промежуток времени. Это особенно наглядно проявляется в тех случаях, когда физическое тело движется в одной системе отсчёта и покоится в другой. Например, человек, сидящий в движущемся поезде, проходит определённый путь s в системе отсчёта, связанной с землёй, а в системе отсчёта, связанной с поездом, его путь равен нулю.

Таким образом, **относительность движения проявляется в том, что скорость, траектория, путь и некоторые другие характеристики движения относительны, т. е. они могут быть различны в разных системах отсчёта.**

Замена системы отсчёта может приводить к существенному упрощению характера движения тел. Это обстоятельство сыграло важную роль в развитии науки.

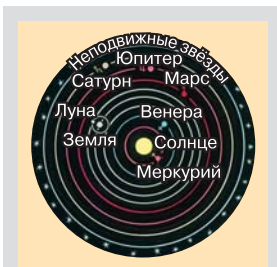
С давних пор люди замечали, что звёзды в течение ночи, так же как и Солнце днём, перемещаются по небу с востока на запад, двигаясь по дугам и делая за сутки полный оборот вокруг Земли. Поэтому в течение многих столетий считалось, что в центре мира находится неподвижная Земля, а вокруг неё обращаются все небесные тела. Такая система мира была названа **геоцентрической** (греческое слово «гео» означает «земля»).

Во II в. александрийский учёный **Клавдий Птолемей** (ок. 100 — ок. 170) обобщил имеющиеся сведения о движении светил и планет в геоцентрической системе и сумел составить довольно точные таблицы, позволяющие определять положение небесных тел в прошлом и будущем, предсказывать наступление затмений и т. д.

Однако со временем, когда точность астрономических наблюдений возросла, стали обнаруживаться расхождения между вычисленными и наблюдаемыми положениями планет. Вносимые при этом исправления делали теорию Птолемея очень сложной и запутанной.



Геоцентрическая
система мира
Клавдия Птолемея



Гелиоцентрическая
система мира
по Копернику



Рис. 22. В гелиоцентрической системе мира видимое движение по небу Солнца днём и звёзд ночью объясняется вращением Земли вокруг своей оси

Новые взгляды на строение Вселенной были подробно изложены в XVI в. польским учёным **Николаем Коперником** (1473—1543). Он считал, что Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца, одновременно вращаясь вокруг своих осей. Такую систему мира называют **гелиоцентрической**, поскольку в ней за центр Вселенной принимается Солнце (по-гречески «гелиос»). В системе мира, введённой Коперником, характер движения планет настолько упростился, что это позволило впоследствии открыть физические законы, описывающие движение тел в Солнечной системе.

Как же с помощью системы мира Коперника можно объяснить видимое нами суточное обращение Солнца вокруг Земли? На рисунке 22 схематично изображён земной шар, освещаемый с одной стороны солнечными лучами, и человек (наблюдатель), который в течение суток находится в одном и том же месте Земли. Вращаясь вместе с Землёй, он наблюдает за перемещением светил.

Воображаемая ось, вокруг которой вращается Земля, как бы пронзает земной шар, проходя через Северный (N) и Южный (S) географические полюсы. Стрелочка указывает направление вращения Земли — с запада на восток.

На рисунке 22, а земной шар изображён в тот момент времени, когда он как бы вывозит наблюдателя с тёмной ночной стороны на освещённую Солнцем, дневную. Но наблюдатель, вращаясь вместе с Землёй относительно её оси с запада на восток со скоростью, приблизительно равной 200 м/с^1 , тем не менее не ощущает этого движения, как не ощущаем его мы с вами. Поэтому ему кажется, что Солнце обращается вокруг Земли, поднимаясь из-за горизонт

¹ Скорость вращения точек поверхности Земли относительно оси зависит от широты местности: она возрастает от нуля (на полюсах) до 465 м/с (на экваторе).

та, перемещается в течение дня (рис. 22, б) с востока на запад, а вечером уходит за горизонт (рис. 22, в). Затем наблюдатель видит перемещение звёзд с востока на запад в течение ночи (рис. 22, г).

Итак, по системе мира Коперника видимое вращение Солнца и звёзд, т. е. смена дня и ночи, объясняется вращением Земли вокруг своей оси. Время, за которое земной шар делает полный оборот, называют *сутками*.

Согласно современным представлениям, во Вселенной не существует центра, так же как и не существует «истинной» системы отсчёта. При рассмотрении движений, происходящих на Земле, удобна система отсчёта, связанная с Землёй. При описании движения планет удобна *гелиоцентрическая система отсчёта*, в которой начало координат совмещено с центром Солнца, а координатные оси направлены на три далёкие звезды.

Тем не менее при переходе от описания движения тел к рассмотрению вопроса о причинах движения обнаруживается принципиальное преимущество определённого класса систем отсчёта. Об этом вы узнаете из следующего параграфа.



1. В чём проявляется относительность движения? Ответ проиллюстрируйте примерами. **2.** В чём основное отличие гелиоцентрической системы мира от геоцентрической? **3.** Объясните смену дня и ночи на Земле в гелиоцентрической системе (см. рис. 22).



1. Пассажир скорого поезда смотрит в окно на вагоны встречного поезда. В момент, когда последний вагон встречного поезда прошёл мимо его окна, пассажир ощутил, что его движение резко замедлилось. Почему?

2. Почему дождевые капли в безветренную погоду оставляют наклонные прямые полосы на стёклах равномерно движущегося железнодорожного вагона?

3. В некоторых случаях скорость тела может быть одинаковой в разных системах отсчёта. Например, поезд движется с одной и той же скоростью в системе отсчёта, связанной со зданием вокзала, и в системе отсчёта, связанной с растущим у дороги деревом. Не противоречит ли это утверждению о том, что скорость относительна? Ответ поясните.



УПРАЖНЕНИЕ 9

1. Вода в реке движется со скоростью 2 м/с относительно берега. По реке плывёт плот. Какова скорость плота относительно берега; относительно воды в реке?
2. Пароход идёт от Нижнего Новгорода до Астрахани 5 сут , а обратно 7 сут . Сколько времени плывут по течению плоты от Нижнего Новгорода до Астрахани?
3. В тихую безветренную погоду Дракон пролетает от своего логова до места охоты за $3 \text{ ч } 40 \text{ мин}$ со скоростью $7,5 \text{ м/с}$. Сколько времени требуется Дракону на обратный путь, если подует встречный ветер со скоростью 150 м/мин ?
4. Благодаря суточному вращению Земли человек, сидящий на стуле в своём доме в Москве, движется относительно земной оси со скоростью примерно 900 км/ч . Сравните эту скорость с начальной скоростью пули относительно пистолета, которая равна 250 м/с .
- 5*. Торпедный катер идёт вдоль шестидесятой параллели южной широты со скоростью 90 км/ч по отношению к суше. Скорость суточного вращения Земли на этой широте равна 223 м/с . Чему равна (в СИ) и куда направлена скорость катера относительно земной оси, если он движется на восток; на запад?

§ 10

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Вам уже известен закон инерции. Согласно этому закону тела (материальные точки) находятся в покое или движутся прямолинейно и равномерно (т. е. сохраняют свою скорость неизменной), если на них не действуют другие тела.

Суть закона инерции впервые была изложена в одной из книг Галилея, опубликованной в начале XVII в.

До этого на протяжении многих веков в науке господствовала точка зрения древнегреческого учёного **Аристотеля** (384—322 до н. э.) и его последователей. Согласно взглядам Аристотеля, при отсутствии внешнего воздействия тело может только покоиться, а для того, чтобы тело двигалось с постоянной скоростью,



ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ

(1564—1642)

Итальянский физик, механик, астроном, философ и математик. Основатель экспериментальной физики. Первым использовал телескоп для наблюдения небесных тел и сделал ряд выдающихся астрономических открытий

нужно, чтобы на него непрерывно действовало другое тело.

Галилей пришёл к выводу о том, что при отсутствии внешних воздействий тело может не только покоиться, но и двигаться прямолинейно и равномерно. А сила, которую приходится прикладывать к телу для поддержания его движения, необходима только для того, чтобы уравновесить другие приложенные к телу силы, например силу трения.

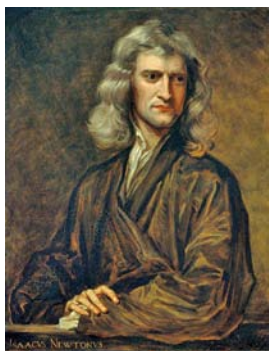
Подобные взгляды на причины движения высказывались некоторыми учёными и до Галилея. Галилей, критически проанализировав идеи своих предшественников, пришёл к правильным выводам и применил их для объяснения конкретных явлений, тем самым дав толчок развитию науки.

В конце XVII в. английский учёный **Исаак Ньютон** обобщил выводы Галилея, сформулировал закон инерции и включил его в качестве первого из трёх законов в основу механики (науки о движении и взаимодействии тел). Поэтому этот закон называют **первым законом Ньютона**.

В изложении Ньютона закон инерции читается так: «Всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние».

В данной формулировке ничего не сказано о системе отсчёта. Может ли закон инерции выполняться во всех системах отсчёта?

Рассмотрим опыт, изображённый на рисунке 23. На тележке находятся два шарика, один из которых лежит на горизонтальной поверхности, а другой подвешен на нити. Сначала тележка движется прямолинейно и

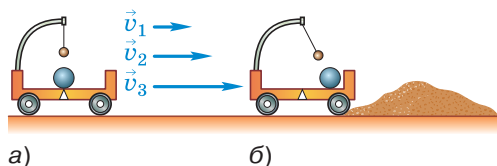


ИСААК НЬЮТОН

(1643—1727)

Английский физик, математик и астроном. Сформулировал три закона динамики, открыл закон всемирного тяготения и явление дисперсии света

Рис. 23. Шары покоятся относительно тележки при её движении с постоянной скоростью и приходят в движение (т. е. меняют скорость) при её торможении



равномерно относительно земли (рис. 23, а). Силы, действующие на каждый из шариков по вертикали, уравновешены, или, как говорят, компенсируют друг друга. По горизонтали никакие силы на них не действуют (силу сопротивления воздуха в данном случае можно не учитывать).

Шарики будут находиться в покое относительно тележки при любой скорости её движения (v_1 , v_2 , v_3 и т. д.) относительно земли — главное, чтобы эта скорость была постоянна.

Но, когда тележка попадает на песчаную насыпь (рис. 23, б), её скорость быстро уменьшается, и тележка останавливается. Во время торможения тележки оба шарика приходят в движение, т. е. изменяют свою скорость относительно тележки, хотя нет никаких сил, которые толкали бы их.

Значит, в системе отсчёта, связанной с тележкой, тормозящей относительно земли, закон инерции не выполняется.

Формулируя свои законы, Ньютон стремился описать «истинное» движение тел, т. е. их движение относительно «абсолютного пространства», существующего независимо от реальных тел. Однако с точки зрения современных представлений «абсолютной» системы отсчёта не существует. Современная формулировка *первого закона Ньютона* выглядит так:

существуют такие системы отсчёта, относительно которых тела сохраняют свою скорость неизменной (по модулю и направлению), если на них не действуют другие тела или действия других тел компенсируются.

Следует помнить, что в первом законе Ньютона речь идёт о телах, которые могут быть приняты за материальные точки.

Те системы отсчёта, в которых закон инерции выполняется, называют *инерциальными*, а те, в которых не выполняется, — *неинерциальными*.

Законы движения и взаимодействия тел, которые вам предстоит изучить в 9 классе, сформулированы для инерциальных систем отсчёта. В инерциальных системах отсчёта эти законы имеют наиболее простой вид. Поэтому, прежде чем применять тот или иной закон для решения задачи, нужно выбрать систему отсчёта, которую можно считать инерциальной.

Можно ли считать инерциальной систему отсчёта, связанную с Землёй? Оказывается, это зависит от характера решаемой задачи и требуемой точности. Пусть, например, речь идёт о движении звёзд в доступной наблюдению части Вселенной. Каждая звезда, ввиду её колоссальной удалённости от других небесных тел, практически не подвержена воздействию с их стороны. Значит, в инерциальной системе отсчёта её движение должно быть прямолинейным и равномерным. Очевидно, в системе отсчёта, связанной с Землёй, это не выполняется — звезда совершает суточное вращение, а не движется по прямой. С гораздо большей степенью точности можно считать инерциальной гелиоцентрическую систему отсчёта.

Тем не менее обычные, сравнительно грубые опыты по изучению движения тел на Земле не позволяют обнаружить неинерциальность системы отсчёта, связанной с Землёй. Поэтому в дальнейшем мы будем пользоваться данной системой отсчёта, считая её инерциальной.

Любая система отсчёта, которая движется относительно инерциальной с постоянной по модулю и направлению скоростью, также является инерциальной. Так, в опыте, изображённом на рисунке 23, а, система отсчёта, свя-

занная с тележкой, движущейся относительно поверхности земли прямолинейно и равномерно, — инерциальна.

Системы отсчёта, движущиеся относительно инерциальных с ускорением, являются неинерциальными.



1. Как движется тело, если на него не действуют другие тела? **2.** Чем отличаются взгляды Галилея от взглядов Аристотеля в вопросе об условиях равномерного движения тел? **3.** Как проводился опыт, изображённый на рисунке 23, и какие выводы из него следуют? **4.** Дайте современную формулировку первого закона Ньютона. **5.** Какие системы отсчёта называют инерциальными, а какие — неинерциальными? Приведите примеры.



УПРАЖНЕНИЕ 10

1. На столе в равномерно и прямолинейно движущемся поезде стоит легкоподвижный игрушечный автомобиль. При торможении поезда автомобиль без внешнего воздействия покатился вперёд, сохраняя свою скорость относительно земли. Выполняется ли закон инерции: а) в системе отсчёта, связанной с землёй; б) в системе отсчёта, связанной с поездом, во время его прямолинейного и равномерного движения; во время торможения? Можно ли в описанном случае считать инерциальной систему отсчёта, связанную с землёй; с поездом?
2. Определите, действие каких сил компенсируется в следующих примерах: на столе лежит книга; на землю равномерно падает берёзовый лист; на крючке безмена висит пакет с яблоками.

§ 11

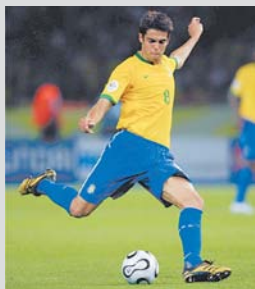
ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Из курса физики 7 класса вам известно, что причиной изменения скорости тела, а значит, и *причиной возникновения ускорения является действие на это тело других тел с некоторой силой.*

Когда на тело действует сразу несколько сил, то оно движется с ускорением, если равнодействующая F этих сил не равна нулю. Напомним, что равнодействующей нескольких сил, одновременно приложенных к телу, называют



Лыжник движется
с ускорением,
так как $F \neq 0$



Чем сильнее футболист
ударит по мячу, тем
дальше полетит мяч

силу, производящую на тело такое же действие, как все эти силы вместе.

Поскольку ускорение возникает в результате действия силы, то естественно предположить, что существует количественная взаимосвязь между этими величинами.

Жизненный опыт убеждает нас в том, что чем больше будет равнодействующая приложенных к телу сил, тем большее ускорение получит при этом тело. Например, чем сильнее футболист бьёт ногой по лежащему на поле мячу, тем большее ускорение приобретает при этом мяч и тем большую скорость он успевает набрать за те доли секунды, пока взаимодействует с ногой футболиста (о приобретённой мячом скорости можно судить по тому, насколько далеко он отлетает после удара).

Многочисленные наблюдения и опыты свидетельствуют также о том, что ускорения, получаемые телами, зависят от массы этих тел.

Чтобы в этом удостовериться, сделаем опыт с легкоподвижной тележкой, на которой укреплен маленькая капельница и два одинаковых лёгких вентилятора (работающих от находящейся внутри каждого из них батарейки одной и той же мощности (рис. 24, а)). Допустим, масса тележки вместе с капельницей и вентиляторами нам известна. К тележке привязан один из концов нити, перекинутой через блок. К другому концу нити прикреплен небольшой груз. Этот груз нужен для того, чтобы скомпенсировать силу трения, действующую на движущуюся тележку.

Вдоль траектории движения тележки расположим бумажную ленту. Откроем кран и включим вентиляторы. В результате взаимодействия их винтов с воздухом вентиляторы будут толкать тележку с некоторой постоянной силой по направлению к ограничителю на краю стола. При этом на бумажной ленте будут оставаться следы капель, падающих через равные промежутки времени T .

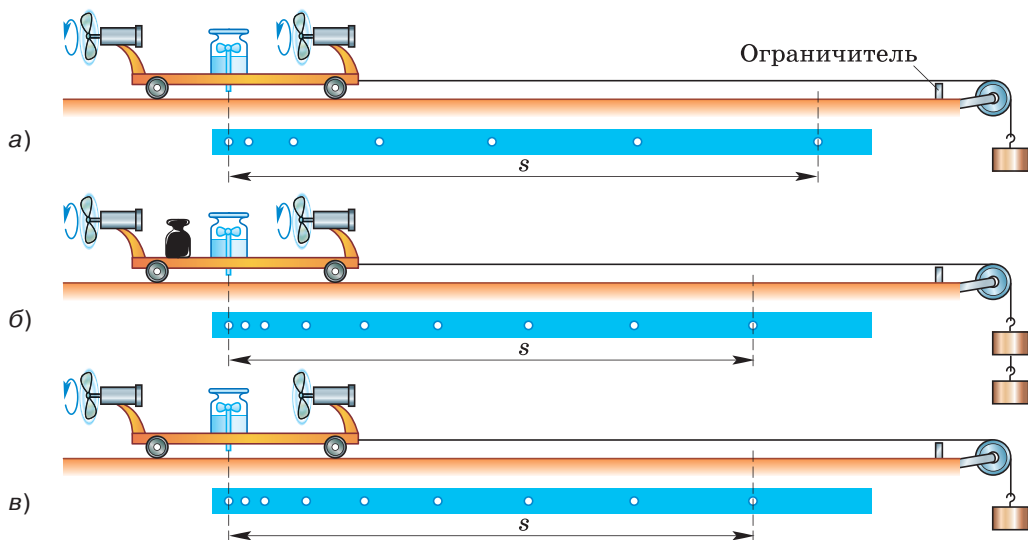


Рис. 24. Демонстрация второго закона Ньютона

Измерив расстояния между соседними метками на ленте, можно убедиться в том, что эти расстояния относятся как ряд нечётных последовательных чисел ($1 : 3 : 5 : 7 : 9 \dots$). Значит, под действием постоянной силы тележка двигалась равноускоренно.

Чтобы определить ускорение тележки, измерим модуль s вектора её перемещения (т. е. расстояние между крайними метками на ленте). Затем посчитаем число n промежутков между соседними метками на ленте, или, что то же самое, число промежутков времени T за время движения тележки. По формуле $t = Tn$ вычислим промежуток времени t , за который тележка переместилась на расстояние s .

Из формулы $s = \frac{at^2}{2}$ выразим модуль ускорения $a = \frac{2s}{t^2}$ и рассчитаем его.

Теперь удвоим массу всей движущейся системы (состоящей из тележки с вентиляторами и капельницей и груза на нити) с помощью гирь, как показано на рисунке 24, б (при этом

одна гирька добавляется к уже имеющемуся грузу на конце нити для компенсации возросшей силы трения).

Повторим опыт. Определив ускорение и сравнив его с ускорением в предыдущем опыте, можно убедиться в том, что при действии одной и той же силы система тел, масса которой стала вдвое больше, приобрела в 2 раза меньшее ускорение, т. е. $\frac{a}{2}$.

Из рассмотренного опыта и ряда подобных следует, что *ускорения, сообщаемые телам одной и той же постоянной силой, обратно пропорциональны массам этих тел.*

С помощью этой же экспериментальной установки можно провести опыт, позволяющий установить количественную взаимосвязь между ускорением и силой, сообщающей телу это ускорение.

Для этого снимем добавленные в предыдущем опыте гири, чтобы масса системы опять стала такой, как в первом опыте (рис. 24, в). Но теперь приведём тележку в движение, включив только один вентилятор, в результате чего на тележку будет действовать в 2 раза меньшая сила, чем при двух включённых вентиляторах (придававших тележке ускорение a).

Как показывают измерения и вычисления, при уменьшении силы в 2 раза ускорение тоже уменьшается в 2 раза, т. е. становится равным $\frac{a}{2}$ (при неизменной массе тележки).

Значит, *ускорение, с которым движется тело постоянной массы, прямо пропорционально приложенной к этому телу силе, в результате которой возникает ускорение.*

Количественную взаимосвязь между массой тела, ускорением, с которым оно движется, и равнодействующей приложенных к телу сил, вызывающих это ускорение, называют

вторым законом Ньютона. Он формулируется так:

ускорение тела прямо пропорционально равнодействующей сил, приложенных к телу, и обратно пропорционально его массе.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Следует помнить, что во втором законе Ньютона, так же как и в первом, под телом подразумевается материальная точка, движение которой рассматривается в инерциальной системе отсчёта.

Математически второй закон Ньютона записывается так:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Из формулы следует, что вектор ускорения \vec{a} совпадает по направлению с вектором \vec{F} равнодействующей приложенных к телу сил. Равнодействующую нескольких сил находят с помощью известных правил векторного сложения:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$$

Второй закон Ньютона можно записать для проекций векторов:

$$a_x = \frac{F_x}{m},$$

а также для их модулей:

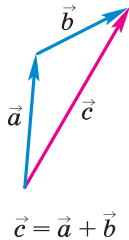
$$a = \frac{F}{m},$$

где a_x и F_x — проекции векторов ускорения и силы на ось X , а a и F — модули этих векторов.

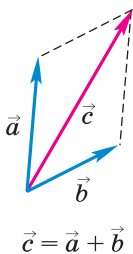
Вам уже известно, что сила измеряется в **ньютонах (Н)**.

Покажем, как с помощью второго закона Ньютона даётся определение единицы силы — 1 Н. Для этого выразим модуль силы:

$$F = ma.$$



а)



б)

Сложение векторов:
а — правило треугольника;
б — правило параллелограмма

В соответствии с этой формулой сила равна единице (1 Н), если масса равна единице (1 кг) и ускорение равно единице (1 м/с²).

В СИ за единицу силы принимается сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с² в направлении действия силы.

Получим соотношение между единицами силы, массы и ускорения:

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2.$$

Второй закон Ньютона позволяет решить основную задачу механики. Если заданы начальные условия и известны силы, действующие на тело, можно, вычислив ускорение тела, определить его положение в любой момент времени.

Пример. Тело массой 1 кг движется вдоль оси X в положительном направлении со скоростью 2 м/с. Когда тело находится в точке с координатой 12 м, на него в направлении движения начинает действовать сила, равная 2 Н. Определите координату тела через 5 с после начала действия силы.

Дано:

$$\begin{aligned} F &= 2 \text{ Н} \\ m &= 1 \text{ кг} \\ v_0 &= 2 \text{ м/с} \\ x_0 &= 12 \text{ м} \\ t &= 5 \text{ с} \end{aligned}$$

x — ?

Решение:

После начала действия силы тело будет двигаться равноускоренно. Запишем закон движения тела:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Проекцию ускорения тела найдём с помощью второго закона Ньютона

$$a_x = \frac{F_x}{m}.$$

Поскольку векторы начальной скорости и силы сонаправлены с осью X , проекции этих векторов равны их модулям: $v_{0x} = v_0$, $F_x = F$. Теперь можем записать выражение для координаты в общем виде:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{F t^2}{2m}.$$

Вычислим координату тела в момент времени $t = 5$ с:

$$x = 12 \text{ м} + 2 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 5 \text{ с} + \frac{2 \text{ Н} \cdot (5 \text{ с})^2}{2 \cdot 1 \text{ кг}} = 47 \text{ м}.$$

Ответ: $x = 47$ м.



1. Что является причиной ускоренного движения тел? **2.** Приведите примеры из жизни, свидетельствующие о том, что чем больше приложенная к телу сила, тем больше сообщаемое этой силой ускорение. **3.** Используя рисунок 24, расскажите о ходе опыта и выводах, следующих из этого опыта. **4.** Сформулируйте второй закон Ньютона. Какой математической формулой он выражается? **5.** Что можно сказать о направлении вектора ускорения и вектора равнодействующей приложенных к телу сил?



1. Баскетбольный мяч, пройдя сквозь кольцо и сетку, под действием силы тяжести сначала движется вниз с возрастающей скоростью, а после удара о пол — вверх с уменьшающейся скоростью. Как направлены векторы ускорения, скорости и перемещения мяча по отношению к силе тяжести при его движении вниз; вверх?

2. Тело движется прямолинейно с постоянным ускорением. Какая величина, характеризующая движение этого тела, всегда направлена с равнодействующей приложенных к телу сил, а какие величины могут быть направлены противоположно равнодействующей?



УПРАЖНЕНИЕ 11

- 1.** Определите силу, под действием которой велосипедист скатывается с горки с ускорением, равным $0,8 \text{ м/с}^2$, если масса велосипедиста вместе с велосипедом равна 50 кг .
- 2.** Через 20 с после начала движения электровоз развил скорость 4 м/с . Найдите силу, сообщающую ускорение, если масса электровоза равна 184 т .
- 3.** Два тела равной массы движутся с ускорениями $0,08$ и $0,64 \text{ м/с}^2$ соответственно. Равны ли модули действующих на тела сил? Чему равна сила, действующая на второе тело, если на первое действует сила $1,2 \text{ Н}$?
- 4.** С каким ускорением будет всплывать находящийся под водой мяч массой $0,5 \text{ кг}$, если действующая на него сила тяжести равна 5 Н , архимедова сила — 10 Н , а средняя сила сопротивления движению — 2 Н ?

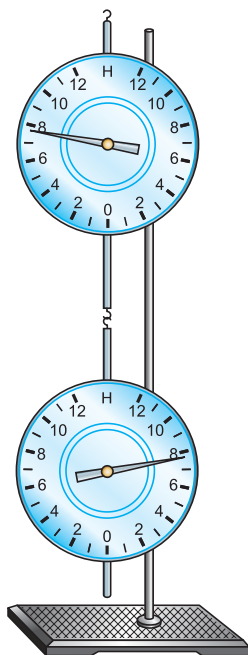


Рис. 25. Сцепленные динамометры показывают одинаковые по модулю силы

Вы знаете, что не бывает одностороннего действия одного тела на другое, тела всегда взаимодействуют друг с другом. Например, во время забивания гвоздя не только молоток действует на гвоздь, но и гвоздь, в свою очередь, действует на молоток, в результате чего молоток останавливается.

Что можно сказать о силах, с которыми два тела действуют друг на друга?

Для ответа на этот вопрос сделаем опыты.

К укреплённому на штативе демонстрационному динамометру подвесим второй такой же динамометр. При этом стрелки приборов отклонятся в противоположные стороны, но их показания будут одинаковы (рис. 25). Следовательно, динамометры взаимодействуют равными по модулю и противоположно направленными силами.

Тела действуют друг на друга с равными по модулю силами и в том случае, если взаимодействие происходит на расстоянии. Опыт, доказывающий это, изображён на рисунке 26. На стержни динамометров надеты круглые магниты, к которым прикреплены плоские магниты. Магниты отталкиваются, поскольку обращены друг к другу одноимёнными полюсами.

До начала опыта динамометры разведены на такое расстояние, при котором силы взаимодействия магнитов практически равны нулю и не регистрируются динамометрами.

Когда один из динамометров стали приближать к другому, их стрелки начали отклоняться от нуля в разные стороны. Это означает, что силы, с которыми магниты действуют друг на друга, противоположны по направлению.

При сближении магнитов показания динамометров возрастают, но в каждый момент они равны друг другу — значит, магниты отталкиваются с равными по модулю силами.

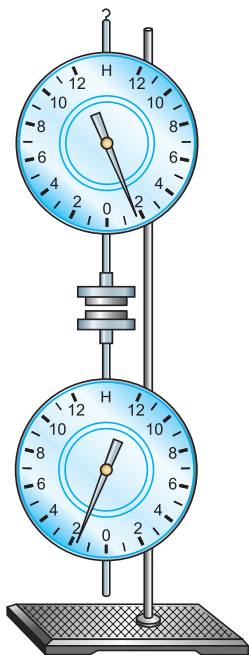


Рис. 26. Взаимодействие магнитов на расстоянии

Теперь рассмотрим опыт, в котором силы взаимодействия измеряются в процессе движения взаимодействующих тел. На рисунке 27 изображён самодвижущийся игрушечный трактор, который тянет на буксире металлическую коробку с грузом. В качестве буксирного троса использованы сцепленные друг с другом трубчатые динамометры, один из которых прикреплён к трактору, а второй — к коробке. Показания динамометров одинаковы, значит, движущиеся трактор и коробка действуют друг на друга с равными по модулю силами.

Эти и многие другие опыты свидетельствуют о том, что

силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположны по направлению.

Этот закон был открыт Ньютоном, его называют **третьим законом Ньютона**.

Математически он записывается в следующем виде:

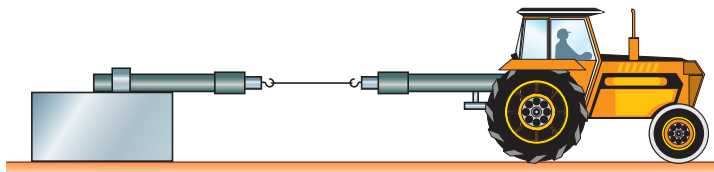
$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Силы, возникающие в результате взаимодействия, направлены вдоль одной прямой. Знак «минус» показывает, что векторы сил направлены в разные стороны.

Любое из наблюдаемых нами движений различных тел можно объяснить с помощью законов Ньютона.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

Рис. 27. Взаимодействие движущихся сцепленных тел



Например, идущий человек движется вперёд благодаря тому, что он отталкивается ногами от земли, т. е. взаимодействует с ней. Человек и Земля действуют друг на друга с одинаковыми по модулю и противоположно направленными силами и получают ускорения, обратно пропорциональные их массам. Поскольку масса Земли огромна по сравнению с массой человека, то ускорение Земли практически равно нулю, т. е. она не меняет свою скорость. Человек же приходит в движение относительно Земли.

Следует отметить, что *силы, возникающие в результате взаимодействия тел, являются силами одной природы*. Например, Земля и Луна взаимодействуют друг с другом посредством сил всемирного тяготения, стальной гвоздь и магнит притягиваются благодаря действию магнитных сил.

Вы уже знаете, что под действием притяжения к Земле предметы, лежащие на опоре, немного сжимаются сами и сжимают находящуюся под ними опору (обычно эти деформации так малы, что мы не замечаем их). В результате и в самих телах, и в опоре возникают силы упругости, посредством которых тело и опора взаимодействуют друг с другом.

Силу, приложенную к опоре и направленную вертикально вниз, называют *весом тела* \vec{P} , а силу, приложенную к телу и направленную вертикально вверх, — *силой реакции опоры* \vec{N} .

Следует помнить, что *силы, о которых говорится в третьем законе Ньютона, никогда не уравновешивают друг друга, поскольку они приложены к разным телам*. (Две равные по модулю и противоположно направленные силы уравновешивают друг друга в том случае, если они приложены к одному телу. Тогда их равнодействующая равна нулю, и тело при этом либо находится в равновесии, т. е. покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.)



Катер находится в равновесии, так как $\vec{F}_A = -\vec{F}_{\text{тяж}}$

Законы Ньютона выполняются в инерциальных системах отсчёта и справедливы для сил разной природы. Вид их не изменяется при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой.



1. Пользуясь рисунками 25—27, расскажите, как проводились изображённые на них опыты и какие выводы были сделаны на основании полученных результатов. **2.** Сформулируйте третий закон Ньютона. Как он записывается математически? **3.** Что можно сказать об ускорении, которое получает Земля при взаимодействии с идущим по ней человеком? Ответ обоснуйте. **4.** Приведите примеры, показывающие, что силы, возникающие в результате взаимодействия двух тел, одинаковы по своей природе. **5.** Почему неверно говорить о равновесии сил, возникающих при взаимодействии тел? **6*.** Вспомните, какие физические величины изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. Докажите, что вид законов Ньютона одинаков в инерциальных системах отсчёта.



1. На весах уравнивали неполный сосуд с водой. Нарушится ли равновесие весов, если в воду опустить палец так, чтобы он не касался дна и стенок сосуда?

2. В известных опытах Отто Герике с магдебургскими полушариями с каждой стороны полушарий впрягалось по 8 лошадей. Возникнет ли большая сила тяги, если прикрепить одно полушарие к стенке, а к другому припрячь 16 лошадей?



УПРАЖНЕНИЕ 12

1. На рисунке 28 изображён лежащий на доске камень. Сделайте в тетради такой же рисунок и изобразите стрелочками две силы, которые по третьему закону Ньютона равны друг другу. Что это за силы? Обозначьте их.



Рис. 28

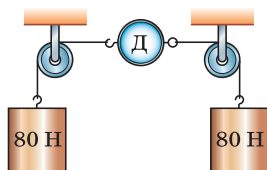


Рис. 29

2. Будет ли превышен предел измерений динамометра Д, изображённого на рисунке 29, если он рассчитан на измерение сил до 100 Н включительно?

3. На рисунке 30, а изображены две тележки, соединённые между собой нитью. Под действием некоторой силы F тележки пришли в движение с ускорением $a = 0,2 \text{ м/с}^2$.

а) Определите проекции на ось X сил \vec{F}_2 и \vec{F}_1 , с которыми нить действует соответственно на вторую и первую тележки. (Массой нити и трением пренебречь.)

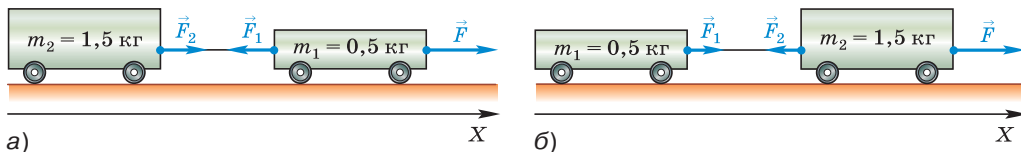


Рис. 30

б) Чему будут равны проекции на ось X сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , если тележки поменять местами, как показано на рисунке 30, б?

в) В каком из двух случаев, показанных на рисунке 30, нить между тележками натянута сильнее?

г) Определите проекцию на ось X силы \vec{F} , под действием которой тележки пришли в движение.

§ 13

СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ ТЕЛ

Мы знаем, что сила — количественная мера взаимодействия тел. В задачах по механике в основном рассматривают три вида сил: силы тяготения, упругости и трения. Обратимся сначала к простому случаю: движение тела под действием одной силы — силы тяжести.

Свободным падением называют движение тел под действием силы тяжести.



Свободное падение спортсменки, совершающей прыжок с вышки в воду

Падение тел, наблюдаемое нами в повседневной жизни, строго говоря, не является свободным, поскольку помимо силы тяжести на тела действует сила сопротивления воздуха. Но если сила сопротивления пренебрежимо мала по сравнению с силой тяжести, то движение тела очень близко к свободному (как, например, при падении маленького тяжёлого гладкого шарика).

Тела падают свободно в безвоздушном пространстве, например внутри сосуда, из которого откачан воздух.

Поскольку сила тяжести, действующая на каждое тело вблизи поверхности земли, посто-

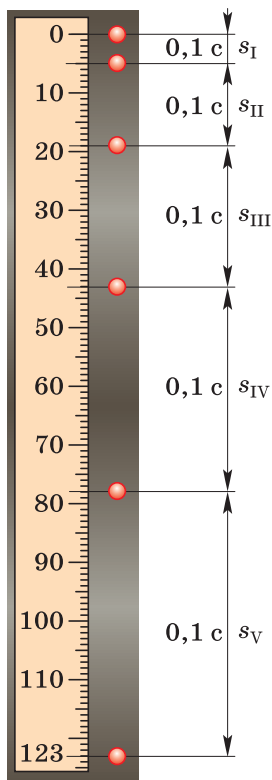


Рис. 31. равноускоренное движение свободно падающего шарика



Стробоскоп

янна, то *свободно падающее тело должно двигаться с постоянным ускорением, т. е. равноускоренно* (это следует из второго закона Ньютона).

Опыты подтверждают этот вывод. На рисунке 31 показаны положения свободно падающего шарика, который фотографировали через каждые 0,1 с с момента начала движения¹.

Мы знаем, что модули векторов перемещений, совершаемых телом при прямолинейном равноускоренном движении за последовательные равные промежутки времени, относятся как ряд последовательных нечётных чисел. Именно такой ряд и образуют соответствующие перемещения шарика, показанные на рисунке 31:

$$\begin{aligned} s_I : s_{II} : s_{III} : s_{IV} : s_V &\approx \\ &\approx 4,9 \text{ см} : 14,1 \text{ см} : 24 \text{ см} : 35 \text{ см} : 45 \text{ см} \approx \\ &\approx 1 : 3 : 5 : 7 : 9. \end{aligned}$$

Таким образом, отношение модулей векторов перемещений, совершённых шариком за последовательные равные промежутки времени, свидетельствует о том, что шарик в свободном падении двигался равноускоренно.

Из рисунка 31 видно, что с момента начала движения шарик прошёл 1,23 м за 0,5 с, причём его начальная скорость была равна нулю. По этим данным можно вычислить модуль вектора ускорения шарика, выразив его из формулы $s = \frac{at^2}{2}$:

$$\begin{aligned} a &= \frac{2s}{t^2} = \frac{2 \cdot 1,23 \text{ м}}{(0,5 \text{ с})^2} = \frac{2,46 \text{ м}}{0,25 \text{ с}^2} = \\ &= 9,84 \text{ м/с}^2 \approx 9,8 \text{ м/с}^2. \end{aligned}$$

¹ Такие фотографии делают стробоскопическим методом. Свободно падающий в темноте шарик освещают кратковременными вспышками света стробоскопа через равные промежутки времени. Положения шарика в моменты вспышек фиксируются с помощью фотоаппарата, затвор которого открыт в течение всего времени падения шарика.



Рис. 32. Не испытывая сопротивления воздуха, все тела в трубке совершают свободное падение

Свободное падение шарика происходит с ускорением $9,8 \text{ м/с}^2$.

А с каким ускорением будут свободно падать другие тела, например кусочек ваты, картонная коробочка из-под обуви, деревянная бусинка? Другими словами: *зависит ли ускорение при свободном падении тел от их массы, объёма, формы и т. д.?*

Ответ на этот вопрос даёт опыт, изображённый на рисунке 32. В стеклянной трубке длиной, приблизительно равной $0,8 \text{ м}$, находятся кусочек пробки, дробинка, птичье пёрышко и монетка. Концы трубки герметично закупорены резиновыми пробками, в одной из которых имеется кран. Откачаем воздух из трубки и закроем кран. При перевёртывании трубки мы видим, что все находящиеся в ней тела одновременно достигают дна. В любой момент времени все эти предметы имеют одинаковые мгновенные скорости, а значит, движутся с одинаковым ускорением, которое называют *ускорением свободного падения* и обозначают буквой g (от лат. *gravitas* — тяжесть).

Существуют способы определения числового значения g с большей точностью (например, до $0,00001 \text{ м/с}^2$). Но при решении задач школьного курса физики, где не требуется высокой точности результата, обычно используют значение $9,8 \text{ м/с}^2$ или даже 10 м/с^2 .

Свободное падение описывается теми же формулами, что и любое равноускоренное движение. Например, при падении из состояния покоя проекции векторов скорости и перемещения рассчитываются по формулам $v_x = a_x t$,

$s_x = \frac{a_x t^2}{2}$, если начальная скорость не равна

нулю, то $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ и т. д. Только вместо a_x ,

обозначающего проекцию произвольного ускорения, ставят g_x , подчёркивая тем самым, что любое свободно падающее тело движется с

ускорением свободного падения. Поэтому формулы выглядят так:

$$v_x = g_x t, s_x = \frac{g_x t^2}{2}, v_x = v_{0x} + g_x t, s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2g_x}.$$

При движении тела вниз векторы ускорения свободного падения, скорости и перемещения направлены в одну и ту же сторону, поэтому их проекции имеют одинаковые знаки.

Если рассматривать, например, падение в воздухе маленького тяжёлого шарика (рис. 33, а), то силой сопротивления воздуха можно пренебречь по сравнению с действующей на шарик силой тяжести и с некоторым приближением считать, что шарик свободно падает. Из рисунка видно, что равнодействующая $F_{\text{ш}}$ сил тяжести и сопротивления воздуха, придающая шарiku ускорение, мало отличается от силы тяжести $F_{\text{тяж, ш}}$, поэтому шарик движется с ускорением, близким к g .

Но падение в воздухе кусочка ваты (рис. 33, б) никак нельзя считать свободным, так как в этом случае сила сопротивления сравнима с силой тяжести и равнодействующая сила $F_{\text{в}}$ значительно меньше силы тяжести $F_{\text{тяж, в}}$. Поэтому кусочек ваты падает в воздухе с ускорением гораздо меньшим ускорения свободного падения.

К выводу о том, что ускорение свободного падения не зависит от массы тела, первым пришёл Галилей в конце XVI в. Одновременно роняя с башни тяжёлые шары и наблюдая за их падением, он обнаружил, что шары, имея разные массы, достигали земли почти одновременно.

Зная, с каким ускорением движется любое тело под действием силы тяжести, согласно второму закону Ньютона, можно записать формулу для нахождения модуля вектора силы тяжести, действующей на тело произвольной массы m :

$$F_{\text{тяж}} = mg.$$

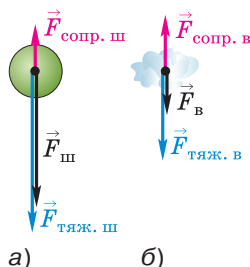
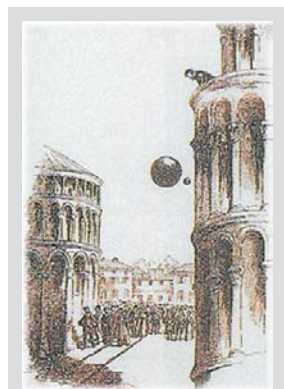


Рис. 33. В воздухе падение шарика допустимо считать свободным, а кусочка ваты — нет



Роняя шары разных масс с Пизанской башни, Галилей доказал независимость ускорения свободного падения от массы падающего тела



1. Что называют свободным падением тел? **2.** Как доказать, что свободное падение шарика, изображённого на рисунке 31, было равноускоренным? **3.** С какой целью ставился опыт, изображённый на рисунке 32, и какой вывод из него следует? **4.** Что такое ускорение свободного падения? **5.** Почему в воздухе кусочек ваты падает с меньшим ускорением, чем железный шарик? **6.** Кто первым пришёл к выводу о том, что свободное падение является равноускоренным движением?



Шарик свободно падает на горизонтальную плиту с высоты H . Нанесите графики зависимости скорости шарика и его высоты над плитой от времени. Временем удара пренебречь.



УПРАЖНЕНИЕ 13

- 1.** С какой высоты свободно падала сосулька, если расстояние до земли она преодолела за 4 с?
- 2.** Определите время падения монетки, если её выронили из рук на высоте 80 см над землёй. (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.)
- 3.** Маленький стальной шарик упал с высоты 45 м. Сколько времени длилось его падение? Какое перемещение совершил шарик за первую и последнюю секунды своего движения? (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.)
- 4.** С какой скоростью камень достигнет земли, если он падал 2,5 с?
- 5.** С высоты 10 м над землёй вертикально вверх брошен камень со скоростью 5 м/с. Определите путь, пройденный камнем до соприкосновения с землёй.

§ 14

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ. НЕВЕСОМОСТЬ

Сила тяжести действует на все тела на Земле: покоящиеся и движущиеся, находящиеся на поверхности Земли и вблизи неё.

Тело, свободно падающее на землю, движется равноускоренно с возрастающей скоростью, поскольку его скорость сонаправлена с силой тяжести и ускорением свободного падения.

Тело, подброшенное вверх, при отсутствии сопротивления воздуха тоже движется с постоянным ускорением, вызванным действием си-

лы тяжести. Но в этом случае начальная скорость \vec{v}_0 , которую телу придали при броске, направлена вверх, т. е. противоположно силе тяжести и ускорению свободного падения. Поэтому скорость тела уменьшается (за каждую секунду — на величину, численно равную модулю ускорения свободного падения, т. е. на 9,8 м/с).

Через определённое время тело достигает наибольшей высоты и на какой-то момент останавливается, т. е. его скорость становится равной нулю. Понятно, что чем бóльшую начальную скорость получило тело при броске, тем больше будет время подъёма и тем на бóльшую высоту оно поднимется к моменту остановки.

Затем под действием силы тяжести тело начинает равноускоренно падать вниз.

При решении задач на движение тела вверх при действии на него только силы тяжести используют те же формулы, что и при прямолинейном равноускоренном движении с начальной скоростью \vec{v}_0 , только a_x заменяют на g_x :

$$v_x = v_{0x} + g_x t$$

$$v_x = v_{0x} + g_x t$$

и

$$s_x = v_{0x} t + \frac{g_x t^2}{2}.$$

$$s_x = v_{0x} t + \frac{g_x t^2}{2}$$

При этом учитывают, что при движении вверх вектор скорости тела и вектор ускорения свободного падения направлены в противоположные стороны, поэтому их проекции всегда имеют разные знаки.

Если, к примеру, ось X направлена вертикально вверх, т. е. сонаправлена с вектором скорости, то $v_x > 0$, значит, $v_x = v$, а $g_x < 0$, значит, $g_x = -g = -9,8 \text{ м/с}^2$ (где v — модуль вектора мгновенной скорости, а g — модуль вектора ускорения).

Если же ось X направлена вертикально вниз, то $v_x < 0$, т. е. $v_x = -v$, а $g_x > 0$, т. е. $g_x = g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

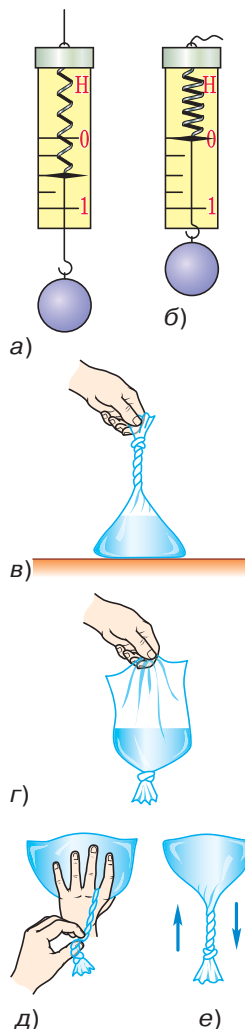


Рис. 34. Демонстрация невесомости тел при их свободном падении

Вес тела, движущегося под действием только силы тяжести, равен нулю. В этом можно убедиться с помощью опытов, изображённых на рисунке 34.

К самодельному динамометру подвешен металлический шарик. Согласно показаниям покоящегося динамометра, вес шарика (рис. 34, а) равен 0,5 Н. Если же нить, удерживающую динамометр, перерезать, то он будет свободно падать (сопротивлением воздуха в данном случае можно пренебречь). При этом его указатель переместится на нулевую отметку, свидетельствуя о том, что вес шарика равен нулю (рис. 34, б). Вес свободно падающего динамометра тоже равен нулю. В данном случае и шарик, и динамометр падают с ускорением \vec{g} , не оказывая друг на друга никакого влияния. Другими словами, и динамометр, и шарик находятся в состоянии **невесомости**.

В рассмотренном опыте динамометр и шарик свободно падали *из состояния покоя*.

Теперь убедимся в том, что тело будет невесомым и в том случае, если его начальная скорость не равна нулю. Для этого возьмём полиэтиленовый пакет и примерно на $\frac{1}{3}$ заполним его водой; затем удалим из пакета воздух, скрутив его верхнюю часть в жгут и завязав на узел (рис. 34, в). Если взять пакет за нижнюю, заполненную водой часть и перевернуть, то свитая в жгут часть пакета под действием веса воды раскрутится и заполнится водой (рис. 34, г). Если же, переворачивая пакет, удерживать жгут, не позволяя ему раскрутиться (рис. 34, д), а затем подкинуть пакет вверх, то и во время подъёма, и во время падения жгут не будет раскручиваться (рис. 34, е). Это свидетельствует о том, что во время полёта вода не действует своим весом на пакет, так как становится невесомой.

Пример. Тело брошено вертикально вверх с начальной скоростью 20 м/с. Через сколько секунд оно будет на высоте 15 м?

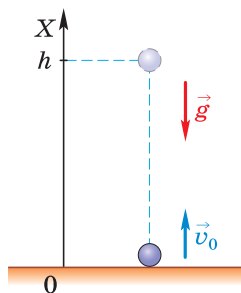


Рис. 35

Дано:

$$v_0 = 20 \text{ м/с}$$

$$h = 15 \text{ м}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$t = ?$$

Решение:

Движение тела является свободным падением с ускорением g .

Ось X направим по направлению движения тела, начало отсчёта совместим с точкой бросания (рис. 35).

Уравнение движения тела имеет вид:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2},$$

где $x_0 = 0$, $v_{0x} = 20 \text{ м/с}$, $g_x = -10 \text{ м/с}^2$.

Подставив значение $x = h = 15 \text{ м}$, получим уравнение:

$$15 = 20t - 5t^2,$$

имеющее корни

$$t_1 = 1 \text{ (с)}, \quad t_2 = 3 \text{ (с)}.$$

Мы получили два значения. Какое же из них выбрать? Оказывается, что правильными являются оба ответа. На высоте 15 м тело окажется дважды: через 1 с на пути вверх и через 3 с на пути вниз.

Ответ: $t_1 = 1 \text{ с}$, $t_2 = 3 \text{ с}$.



1. Действует ли сила тяжести на подброшенное вверх тело во время его подъёма? **2.** С каким ускорением движется подброшенное вверх тело при отсутствии трения? Как меняется при этом скорость движения тела? **3.** От чего зависит наибольшая высота подъёма брошенного вверх тела в том случае, когда сопротивлением воздуха можно пренебречь? **4.** Что можно сказать о знаках проекций векторов мгновенной скорости тела и ускорения свободного падения при свободном движении этого тела вверх? **5.** Расскажите о ходе опытов, изображённых на рисунке 34. Какой вывод из них следует?



УПРАЖНЕНИЕ 14

- Теннисный мяч бросили вертикально вверх с начальной скоростью 9,8 м/с. Через какой промежуток времени скорость поднимающегося мяча уменьшится до нуля? Какое перемещение от места броска совершит при этом мяч? Силой сопротивления воздуха пренебречь.

2. Тело брошено с поверхности земли вертикально вверх. Докажите, что время полёта тела до момента падения на землю вдвое больше времени его подъёма на максимальную высоту. Силой сопротивления воздуха пренебречь.
3. Тело брошено вертикально вверх со скоростью 15 м/с. Какую скорость будет иметь тело при возвращении в точку броска? Силой сопротивления воздуха пренебречь.

§ 15

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

В курсе физики 7 класса вы познакомились с явлением всемирного тяготения. Оно заключается в том, что *между всеми телами во Вселенной действуют силы притяжения*.

К выводу о существовании сил всемирного тяготения (их называют также **гравитационными**) пришёл Ньютон в результате изучения движения Луны вокруг Земли и планет вокруг Солнца.

Заслуга Ньютона заключается не только в его гениальной догадке о взаимном притяжении тел, но и в том, что он сумел найти закон их взаимодействия, т. е. формулу для расчёта гравитационной силы между двумя телами.

Закон всемирного тяготения гласит:

два любых тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

где F — модуль вектора силы гравитационного притяжения между телами массами m_1 и m_2 , r — расстояние между телами (их центрами), G — коэффициент, который называют **гравитационной постоянной**.

Если $m_1 = m_2 = 1$ кг и $r = 1$ м, то, как видно из формулы, гравитационная постоянная G численно равна силе F . Другими словами, *грави-*

тационная постоянная численно равна силе F притяжения двух тел массой по 1 кг, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга.

Гравитационная постоянная была измерена экспериментально в 1798 г. английским физиком **Генри Кавендишем** (1731—1810). Её значение

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

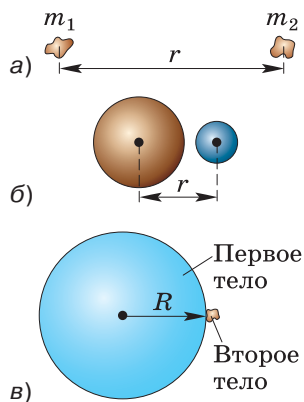


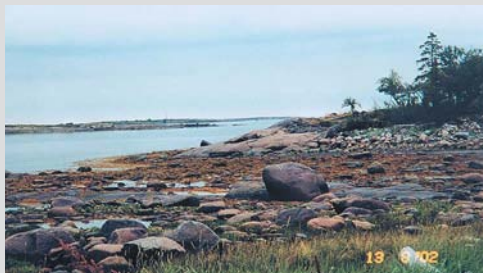
Рис. 36. Условия, определяющие границы применимости закона всемирного тяготения

Формула даёт точный результат при расчёте силы всемирного тяготения в трёх случаях: 1) если размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними (рис. 36, а); 2) если оба тела однородны и имеют шарообразную форму (рис. 36, б); 3) если одно из взаимодействующих тел — шар, размеры и масса которого значительно больше, чем у второго тела (любой формы), находящегося на поверхности этого шара или вблизи неё (рис. 36, в).

Третий из рассмотренных случаев является основанием для того, чтобы рассчитывать по приведённой формуле силу притяжения к Земле любого из находящихся на ней тел. При этом в качестве расстояния между телами следует брать радиус Земли, поскольку размеры всех тел, находящихся на её поверхности или вблизи неё, пренебрежимо малы по сравнению с земным радиусом.

По третьему закону Ньютона яблоко, висящее на ветке или падающее с неё с ускорением свободного падения, притягивает к себе Землю с такой же по модулю силой, с какой его притягивает Земля. Но ускорение Земли, вызванное силой её притяжения к яблоку, близко к нулю, поскольку масса Земли несоизмеримо больше массы яблока.

Закон всемирного тяготения объясняет не только падение тел на Землю, но и устойчивость Солнечной системы, движение Луны и других небесных тел. Даже такое интересное явление, как океанские приливы и отливы, — проявление этого закона.



Прилив и отлив на Белом море



1. Что было названо всемирным тяготением? **2.** Как иначе называют силы всемирного тяготения? **3.** Кто и в каком веке открыл закон всемирного тяготения? **4.** Сформулируйте закон всемирного тяготения. Запишите формулу, выражающую этот закон. **5.** Приведите примеры проявления силы тяготения. **6.** Притягивается ли Земля к висящему на ветке яблоку?



1. Почему предметы, находящиеся в комнате, несмотря на их взаимное притяжение, не приближаются друг к другу?

2. Мяч, подброшенный мальчиком, в течение некоторого времени двигался вверх. При этом его скорость всё время уменьшалась, пока не стала равной нулю. Затем мяч стал падать вниз с возрастающей скоростью. Объясните: а) действовала ли на мяч сила притяжения к Земле во время его движения вверх; вниз; б) что послужило причиной уменьшения скорости мяча при его движении вверх; увеличения его скорости при движении вниз; в) почему при движении мяча вверх его скорость уменьшалась, а при движении вниз — увеличивалась.



УПРАЖНЕНИЕ 15

- 1.** Во сколько раз изменится сила взаимного притяжения двух шаров, если расстояние между ними уменьшить в 3 раза?
- 2.** С какой силой притягиваются в море два корабля массой по 50 т каждый, находящиеся на расстоянии 1 км друг от друга?
- 3.** Космическая станция летит от Земли к Луне. Как меняется при этом модуль вектора силы её притяжения к Земле; к Луне? С одинаковыми или различными по модулю силами притягивается станция к Земле и Луне, когда она находится посередине между ними? Если силы различны, то какая больше и во сколько раз? Все ответы обоснуйте. (Масса Земли примерно в 81 раз больше массы Луны.)
- 4.** Масса Солнца в 330 000 раз больше массы Земли. Верно ли, что Солнце притягивает Землю в 330 000 раз сильнее, чем Земля притягивает Солнце? Ответ поясните.

Притяжение тел к Земле — один из случаев всемирного тяготения. Для нас, жителей Земли, эта сила имеет большое значение.

Для любого тела массой m , находящегося на поверхности Земли или вблизи неё, можно записать¹:

$$mg \approx G \frac{M_3 m}{R_3^2}, \text{ или } g \approx G \frac{M_3}{R_3^2}.$$

Из последней формулы следует, что ускорение свободного падения постоянно для всех тел, находящихся на поверхности Земли, так как зависит от массы Земли и её радиуса (т. е. расстояния между центром Земли и данным телом).

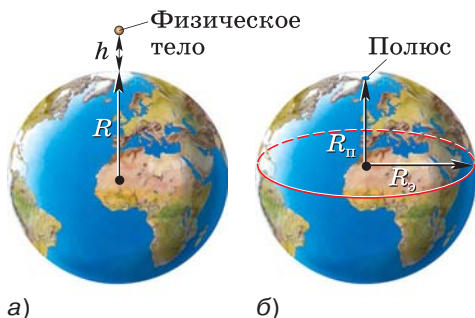


Рис. 37. Значение ускорения свободного падения зависит от высоты тела над Землёй и географической широты места

Если тело поднять на высоту h над Землёй, как показано на рисунке 37, а, то расстояние между этим телом и центром Земли будет $R_3 + h$. Тогда $g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$.

Чем больше высота h , тем меньше g и тем меньше сила тяжести, действующая на тело. Значит, с увеличением высоты тела над поверхностью Земли действующая на него сила тяжести уменьшается за счёт уменьшения ускорения свободного падения. Например, если альпинист массой 80 кг поднимется на гору высотой 3 км, то действующая на него сила тяжести уменьшится на 0,7 Н (или всего на 0,09%). Уменьшение это очень невелико. Поэтому во многих случаях при расчёте силы тя-

¹ Равенство не будет точным, так как, строго говоря, система отсчёта, связанная с Землёй, не является инерциальной.

жести тела, находящегося на небольшой высоте над Землёй, ускорение свободного падения считают равным $9,8 \text{ м/с}^2$, пренебрегая его небольшим уменьшением.

Значение ускорения свободного падения g зависит также от географической широты места на земном шаре. Оно меняется от $9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,83 \text{ м/с}^2$ на полюсах, т. е. на полюсах оно чуть больше, чем на экваторе (рис. 37, б).

Подставив в формулу для ускорения свободного падения вместо массы и радиуса Земли соответственно массу и радиус какой-либо другой планеты или её спутника, можно определить значение ускорения свободного падения на поверхности любого из этих небесных тел. Например, ускорение свободного падения на Луне рассчитывается по формуле:

$$g_{\text{Л}} \approx G \frac{M_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}^2}$$

и равно $1,6 \text{ м/с}^2$.

Ускорение свободного падения, а значит, и сила притяжения тел к Луне в 6 раз меньше, чем на Земле. Например, человек, масса которого 60 кг , к Земле притягивается с силой 588 Н , а к Луне — с силой всего 98 Н .



- 1.** Верно ли, что притяжение тел к Земле является одним из примеров всемирного тяготения? **2.** Как меняется сила тяжести, действующая на тело, при его удалении от поверхности Земли? **3.** В каком случае сила тяжести, действующая на одно и то же тело, будет больше: если это тело находится в экваториальной области земного шара или на одном из полюсов? **4.** Почему ускорение свободного падения в данной точке земного шара одинаково для тел любой массы? **5.** Что вы знаете об ускорении свободного падения на Луне?



УПРАЖНЕНИЕ 16

- 1.** Чему равна сила тяжести, действующая на тело массой $2,5 \text{ кг}$; 600 г ; $1,2 \text{ т}$; 50 т ? (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.)
- 2.** Определите приблизительно силу тяжести, действующую на человека массой 64 кг . (Принять $g = 10 \text{ м/с}^2$.) Притягивается ли земной шар к этому человеку? Если да, то чему приблизительно равна эта сила?

3. Первый советский искусственный спутник Земли был запущен 4 октября 1957 г. Определите массу этого спутника, если известно, что на Земле на него действовала сила тяжести, равная 819,3 Н.
4. Ракета пролетает на расстоянии, равном 5000 км от поверхности Земли. Можно ли рассчитывать действующую на космическую ракету силу тяжести, принимая $g = 9,8 \text{ м/с}^2$? (Радиус Земли приблизительно равен 6400 км.) Ответ поясните.
5. Ястреб в течение некоторого времени может парить на одной и той же высоте над Землёй. Значит ли это, что на него не действует сила тяжести? Что произойдёт с ястребом, если он сложит крылья?
- 6*. С Земли стартует космическая ракета с космонавтом на борту. На каком расстоянии от поверхности Земли сила тяжести, действующая на космонавта, будет в 4 раза меньше, чем перед стартом; в 9 раз меньше, чем перед стартом?

Это любопытно...

Открытие планеты Нептун

С помощью закона всемирного тяготения и законов Ньютона были определены траектории движения планет Солнечной системы, а также рассчитаны их координаты в любой момент времени на много лет вперёд. Для этого сначала по закону всемирного тяготения вычислялась сила гравитационного взаимодействия между Солнцем и данной планетой. Затем с помощью второго закона Ньютона рассчитывалось ускорение, с которым планета движется вокруг Солнца. А по ускорению определялись и другие величины, характеризующие движение, в том числе и координаты.

При этом учитывалось также влияние других планет Солнечной системы на движение данной планеты.

Правильность рассчитанных таким образом орбит планет и их положения в любой момент времени подтверждалась результатами астрономических наблюдений.

В 1781 г. английский астроном **Уильям Гершель** (1738—1822) путём наблюдений открыл седьмую планету Солнечной системы, которую называли Уран.

Вскоре после этого было рассчитано, как будут меняться со временем координаты Урана и по какой орбите он будет двигаться.

В результате многолетних наблюдений за движением Урана в первой половине XIX в. учёные окончательно убедились в том, что реальная орбита Урана не совпадает с вычисленной. Создавалось впечатление, что за Ураном находится ещё одна планета, которая притягивает к себе Уран и тем самым влияет на его движение.

По отклонениям в движении Урана сначала английский учёный **Джон Адамс** (1819—1892), а несколько позже и французский учёный **Урбен Леверье** (1811—1877) на основании закона всемирного тяготения сумели вычислить местоположение этой предполагаемой планеты.

Адамс первым закончил работу и обратился к директору одной из обсерваторий с просьбой организовать поиски планеты, координаты которой он нашёл с помощью теоретических расчётов. В эту же обсерваторию с подобной просьбой обратился и Леверье.

Но по какой-то причине поиск планеты был отложен на неопределённый срок. Тогда Леверье послал письмо с указанием точных координат планеты, которая, по его мнению, должна была находиться за Ураном, молодому сотруднику Берлинской обсерватории **Иоганну Галле** (1812—1910).

23 сентября 1846 г. Галле, получив это письмо, без промедления приступил к наблюдениям и в ту же ночь обнаружил научно предсказанную планету, координаты которой всего лишь на полградуса отличались от указанных в письме.

Пять дней спустя Леверье получил от директора Берлинской обсерватории поздравительное письмо, в котором, в частности, говорилось: «Ваше имя отныне будет связано с наиболее выдающимся из мыслимых доказательств справедливости закона всемирного тяготения».

По предложению Леверье планету назвали Нептун.

И только несколько лет спустя в научном мире была признана и заслуга Адамса в открытии Нептуна.

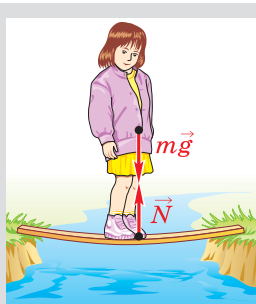
Желая подчеркнуть, что открытие планеты сделано теоретическим путём, т. е. исключительно с помощью расчётов, основанных на законах физики, говорят, что Нептун был открыт «на кончике пера».

§ 17

СИЛА УПРУГОСТИ

Вблизи поверхности Земли на любое тело действует сила тяжести, однако большинство тел вокруг нас не падают с ускорением, а находятся в покое.

Груз, висящий на пружине, неподвижен — значит, кроме силы тяжести, на него действует ещё какая-то сила, равная силе тяжести по модулю и противоположная по направлению. В 7 классе вы узнали, что эта сила действует на груз со стороны пружины и обусловлена её деформацией.



Девочка неподвижна — значит, кроме силы тяжести, на неё действует другая сила

Деформация возникает в том случае, когда отдельные части одного и того же тела совершают разные перемещения. Так, при подвешивании к пружине груза её верхний конец остаётся неподвижен, а нижний конец смещается на некоторое расстояние (заметим, что при таком рассмотрении к пружине неприменима модель материальной точки).

Если после прекращения внешнего воздействия деформированное тело (пружина, резиновый шнур и др.) восстанавливает свою форму и размеры, то деформацию называют *упругой*. Силу, действующую со стороны упруго деформированного тела на тело, вызывающее деформацию, называют *силой упругости*.

Для случая малых упругих деформаций связь силы упругости с величиной деформации довольно проста и выражается **законом Гука**.

Возникающая при деформации сила упругости прямо пропорциональна удлинению тела.

$$F_{\text{упр}} = k|x|,$$

где k — положительный коэффициент пропорциональности, называемый жёсткостью тела, $|x|$ — удлинение (модуль разности длин тела в деформированном и недеформированном состояниях).

$$F_{\text{упр}} = k|x|$$

Сила упругости приложена к телу, вызывающему деформацию данного тела, а её направление противоположно направлению деформации (тело как бы сопротивляется попытке его деформировать). С учётом этого, если ввести вектор \vec{x} перемещения конца пружины (рис. 38), то закон Гука можно записать в векторной форме:

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k\vec{x}.$$

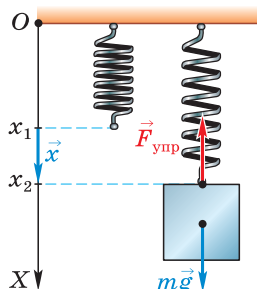


Рис. 38. Направление силы упругости противоположно направлению деформации

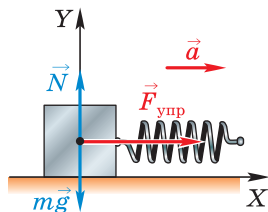


Рис. 39

Силу упругости, действующую со стороны нити, называют силой натяжения нити \vec{T} , со стороны опоры — силой реакции опоры \vec{N} .

Рассмотрим, как применить законы Ньютона к системе тел, в которой действуют силы упругости.

Пример 1. С помощью пружины жёсткостью 80 Н/м по гладкой горизонтальной поверхности перемещают металлический кубик массой 600 г , прикладывая к нему горизонтальную силу. Определите удлинение пружины, если ускорение кубика $0,4 \text{ м/с}^2$.

Дано:

$$m = 600 \text{ г}$$

$$k = 80 \text{ Н/м}$$

$$a = 0,4 \text{ м/с}^2$$

$x — ?$

СИ

$$0,6 \text{ кг}$$

Решение:

Кубик движется поступательно, поэтому его можно считать материальной точкой. Будем решать задачу в инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй. Учитывая, что сила — результат действия на тело других тел, выясним, какие тела, а следовательно, и силы действуют на кубик, и покажем их на рисунке. На кубик действуют сила тяжести, сила реакции опоры и сила упругости со стороны пружины (рис. 39). Так как поверхность гладкая, трением можно пренебречь.

Запишем второй закон Ньютона:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{упр}}.$$

Ось X удобно выбрать по направлению движения тела, ось Y — по направлению силы реакции опоры. Спроецировав векторы на выбранные оси, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} ma = F_{\text{упр}} & (\text{ось } X), \\ 0 = -mg + N & (\text{ось } Y). \end{cases}$$

В данном случае второе уравнение для решения задачи нам не потребуется.

Модуль силы упругости определим по закону Гука

$$F_{\text{упр}} = kx, \text{ тогда } ma = kx.$$

Выразим и вычислим искомую величину

$$x = \frac{ma}{k},$$

$$x = \frac{0,6 \text{ кг} \cdot 0,4 \text{ м/с}^2}{80 \text{ Н/м}} = 0,003 \text{ м} = 3 \text{ мм}.$$

Ответ: $x = 3 \text{ мм}$.

Пример 2. Через неподвижный блок перекинута нить, к концам которой подвешены грузы массой 3 и 2 кг. Найдите ускорение грузов и силу натяжения нити. Трение нити о блок отсутствует, масса нити пренебрежимо мала.

Дано:

$$m_1 = 3 \text{ кг}$$

$$m_2 = 2 \text{ кг}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$a = ?$$

$$T = ?$$

Решение:

Система, рассматриваемая в задаче, состоит из двух грузов, связанных нитью. Грузы можно считать материальными точками, так как они движутся поступательно. Движение грузов

будем рассматривать в инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй. Каждый из грузов взаимодействует с Землёй и нитью, значит, на каждый из них действуют две силы: сила тяжести и сила натяжения нити (рис. 40).

Если систему предоставить самой себе, то груз массой m_1 начнёт опускаться, а массой m_2 — подниматься.

Запишем для каждого груза второй закон Ньютона в векторной форме:

$$\begin{cases} m_1 \vec{a}_1 = m_1 \vec{g} + \vec{T}_1, \\ m_2 \vec{a}_2 = m_2 \vec{g} + \vec{T}_2. \end{cases}$$

Поскольку массой нити и трением нити о блок можно пренебречь, силы натяжения, при-

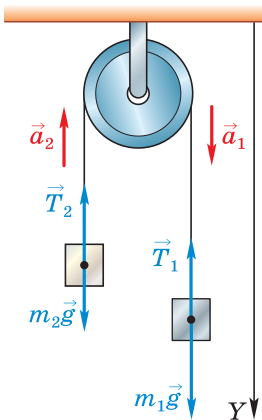


Рис. 40

ложенные к грузам, можно считать равными друг другу: $T_1 = T_2 = T$.

Если считать, что нить нерастяжима, то ускорение грузов будет одинаковым:

$$a_1 = a_2 = a.$$

За положительное направление оси Y примем направление движения груза большей массы. Запишем второй закон Ньютона через проекции на ось Y :

$$\begin{cases} m_1 a = m_1 g - T, \\ -m_2 a = m_2 g - T. \end{cases}$$

Почленно вычитая из первого уравнения второе, получим:

$$m_1 a + m_2 a = m_1 g - T - m_2 g + T,$$

$$(m_1 + m_2) a = (m_1 - m_2) g,$$

$$a = \frac{(m_1 - m_2) g}{m_1 + m_2}.$$

$$a = \frac{(3 \text{ кг} - 2 \text{ кг}) \cdot 10 \text{ м/с}^2}{3 \text{ кг} + 2 \text{ кг}} = 2 \text{ м/с}^2.$$

Из уравнения $m_1 a = m_1 g - T$ выразим силу натяжения нити:

$$T = m_1 g - m_1 a = m_1 (g - a).$$

$$T = 3 \text{ кг} \cdot (10 \text{ м/с}^2 - 2 \text{ м/с}^2) = 24 \text{ Н}.$$

$$\text{Ответ: } a = 2 \text{ м/с}^2; T = 24 \text{ Н}.$$



1. При каких условиях возникает деформация тела? **2.** Что является причиной возникновения силы упругости? **3.** Сформулируйте закон Гука. Запишите формулу, выражающую этот закон. **4.** При каких условиях выполняется закон Гука? **5.** Деформация какого тела вызывает появление силы упругости в следующих случаях: мальчик нагибает ветку яблони; кубик находится в равновесии на наклонной плоскости; силу измеряют динамометром?



УПРАЖНЕНИЕ 17

- 1.** Изобразите силы, действующие на вазу, стоящую на столе; действующие на металлический шарик, подвешенный на нити.

2. Ученик проводил исследование по изучению зависимости деформации пружины от приложенной к ней силы. Подвешивая к пружине грузы известной массы, он измерял растяжение (деформацию) пружины. По результатам опыта ученик составил таблицу.

F , Н	1	2	3
x , см	$2,5 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$	$7,4 \pm 0,1$

Постройте график зависимости деформации пружины от модуля приложенной к ней силы с учётом абсолютной погрешности измерения $\Delta x = 1$ мм.

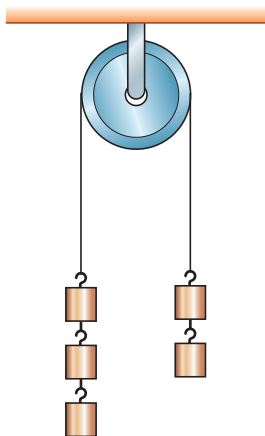


Рис. 41

Указания. В данном эксперименте ученик изменял силу и измерял деформацию пружины, поэтому ось абсцисс обозначьте F , а ось ординат x (масштаб: 1 см — 1 Н, 1 см — 1 см). Каждому значению силы на координатной плоскости будет соответствовать не точка, а отрезок, равный удвоенной погрешности измерения. Если ученик правильно произвёл измерения, прямая, построенная вами, будет проходить через все отрезки.

3. Груз какой массы нужно подвесить к пружине жёсткостью 80 Н/м, чтобы растянуть её на 6 см?
4. Электровоз толкает вагон массой 20 т, при этом буферная пружина сжимается на 8 см. С каким ускорением будет двигаться вагон, если жёсткость пружины 50 000 Н/м?
5. С каким ускорением движутся грузы (рис. 41), если их массы одинаковы? Трение в системе отсутствует, нить считать невесомой и нерастяжимой.

§ 18

СИЛА ТРЕНИЯ

Согласно первому закону Ньютона движение тела с постоянной скоростью не требует для своего поддержания внешнего воздействия. Почему же тележка, которую толкнули, через некоторое время останавливается, если её не подталкивать? Каждый из вас ответит, что это происходит из-за трения.

Как вам известно, различают трение покоя, скольжения и качения. Рассмотрим их более подробно.

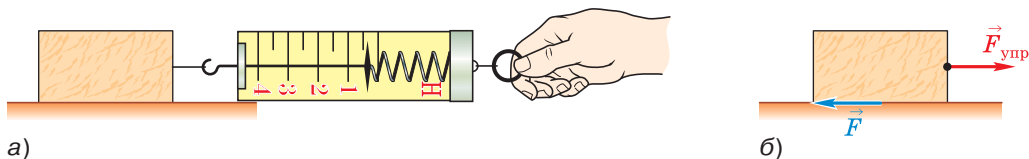


Рис. 42. Возникновение силы трения покоя

Проведем опыт. Положим на стол брусок. Он находится в покое под действием двух сил: силы тяжести и силы реакции опоры. С помощью динамометра слегка потянем брусок в горизонтальном направлении (рис. 42, а). Увидим, что он не сдвинулся с места, хотя показание динамометра отлично от нуля. Значит, на брусок действует сила, равная по модулю и противоположная по направлению силе, с которой мы его тянем, — силе упругости (рис. 42, б). Эту силу называют *силой трения покоя*.

Будем постепенно увеличивать силу, но так, чтобы брусок оставался на месте. Сила трения покоя по-прежнему будет равна по модулю силе упругости, т. е. возрастёт на такую же величину.

При некотором значении действующей на брусок силы он, наконец, придёт в движение. Это означает, что сила трения покоя может изменяться от нуля до некоторого максимального значения.

Наибольшее значение силы трения, при котором скольжение ещё не началось, называют максимальной силой трения покоя.

От каких величин может зависеть значение максимальной силы трения покоя?

Жизненный опыт подсказывает, что чем тяжелее тело, тем труднее сдвинуть его с места. Поставим на первый брусок ещё один такой же, увеличив силу давления бруска на опору, а следовательно, и силу реакции опоры (согласно третьему закону Ньютона) в 2 раза. Измерим

с помощью динамометра максимальную силу трения покоя. Увидим, что её значение в 2 раза больше, чем в первом опыте. Поставив на два бруска третий, обнаружим, что максимальная сила трения покоя увеличилась в 3 раза.

Таким образом, *модуль максимальной силы трения покоя прямо пропорционален модулю силы реакции опоры*:

$$F_{\text{тр. п}} = \mu N,$$

где μ — коэффициент трения, N — модуль силы реакции опоры.

Коэффициент трения зависит от материалов и качества обработки поверхностей соприкасающихся тел. Так, если бы мы изменили условие опыта, постелив на стол металлический лист, значение максимальной силы трения покоя изменилось бы.

Как мы видели, иногда сила трения делает движение невозможным. Но в то же время без действия сил трения покоя не могли бы начать движение ни мы, ни животные, ни автомобили.

Так, при ходьбе усилием мышц ног мы создаём силу, направленную назад (вы же помните свои ощущения, когда на дороге под снегом внезапно попадаетесь замёрзшая лужа!). При этом со стороны дороги на подошву действует сила трения покоя, сообщающая нам ускорение, направленное вперёд. Чтобы увеличить трение покоя, дорожки посыпают песком или гранитной крошкой, а подошву обуви и автопокрышки делают рифлёными.

Если сила, действующая на покоящееся тело, хотя бы немного превысит максимальную силу трения покоя, то тело начнёт скользить, и на него будет действовать *сила трения скольжения*. Эта сила всегда направлена противоположно скорости движения тела относительно соприкасающегося с ним тела.

Опыт показывает, что значение силы трения скольжения при малых скоростях движения



тела можно считать постоянным и равным максимальной силе трения покоя:

$$F_{\text{тр. п}} \approx F_{\text{тр}} = \mu N.$$

Обычно коэффициент трения меньше единицы (табл. 1). По этой причине любое тело легче перемещать волоком, чем поднимать или переносить. Чтобы уменьшить силу трения скольжения, используют смазку. Так, для уменьшения трения в деталях и предотвращения их перегрева и разрушения все автомобили имеют встроенную систему смазки.

Таблица 1. Коэффициент трения скольжения

Материалы	Коэффициент трения
Дерево по дереву	0,3—0,5
Резина по асфальту сухому мокрому	0,7 0,4
Дерево по льду	0,03—0,04
Сталь по льду	0,02

Если одно тело не скользит, а катится по поверхности другого, то возникающее трение называют *трением качения*. Когда вы перевозите по магазину свои покупки на тележке, едете на велосипеде, перекатываете брёвна по земле, препятствует движению именно трение качения. Сила трения качения существенно меньше силы трения скольжения, поэтому, когда возможно, трение скольжения заменяют трением качения.

Пример. На горизонтальном участке дороги автомобиль массой 3 т, движущийся со скоростью 72 км/ч, начинает торможение с заблокированными колёсами. Определите, через какое время скорость автомобиля будет 36 км/ч, если коэффициент трения 0,6.

Дано:

$$m = 3 \text{ т}$$

$$v_0 = 72 \text{ км/ч}$$

$$v = 36 \text{ км/ч}$$

$$\mu = 0,6$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$t = ?$$

СИ

$$3 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$20 \text{ м/с}$$

$$10 \text{ м/с}$$

Решение:

Так как автомобиль движется поступательно, можно считать его материальной точкой. Решать задачу будем в инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй.

На автомобиль действуют сила тяжести, сила реакции опоры и сила трения скольжения. Ось X сонаправим с направлением движения тела, ось Y — с силой реакции опоры (рис. 43).

Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}}.$$

В проекциях на оси получим:

$$\begin{cases} -ma = -F_{\text{тр}} & (\text{ось } X), \\ 0 = -mg + N & (\text{ось } Y). \end{cases}$$

Учитывая, что $F_{\text{тр}} = \mu N$, запишем:

$$ma = \mu mg.$$

Тогда

$$a = \mu g.$$

Так как известны начальная и конечная скорости движения автомобиля, из формулы для ускорения

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}, \quad a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

можно выразить время:

$$t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x} = \frac{v - v_0}{-a}, \quad t = \frac{v_0 - v}{a}.$$

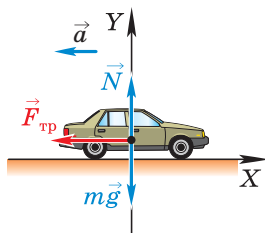


Рис. 43

Подставим выражение для a в формулу для нахождения t :

$$t = \frac{v_0 - v}{\mu g}.$$

Мы получили совсем не очевидный результат: время торможения автомобиля не зависит от его массы!

$$t = \frac{20 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с}}{0,6 \cdot 10 \text{ м/с}^2} \approx 1,7 \text{ с}.$$

Ответ: $t \approx 1,7 \text{ с}$.



1. Приведите примеры различных видов трения. **2.** От чего зависит сила трения покоя? **3.** По какой формуле можно рассчитать силу трения скольжения? **4.** Как можно уменьшить силу трения? Приведите примеры. **5.** Приведите примеры полезного проявления трения.



УПРАЖНЕНИЕ 18

1. На столе в купе поезда лежит книга. Изобразите силу трения покоя, действующую на книгу, в следующих случаях: а) поезд разгоняется; б) поезд движется на прямолинейном участке пути равномерно; в) поезд тормозит.

2. Ученик провёл исследование зависимости максимальной силы трения покоя от силы реакции опоры. По результатам эксперимента он построил график (рис. 44). Какое значение для коэффициента трения получил ученик?

3. Коробку равномерно тянут по горизонтальной поверхности с помощью верёвки, составляющей с горизонтом угол 60° . Определите массу коробки, если сила натяжения верёвки равна 12 Н, коэффициент трения — 0,3.

4. Автомобиль, движущийся по горизонтальному участку дороги со скоростью 54 км/ч, начинает тормозить. Определите, какой путь он пройдёт до остановки, если коэффициент трения 0,6.

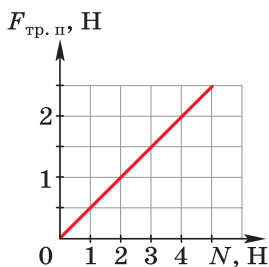


Рис. 44



ЗАДАНИЕ



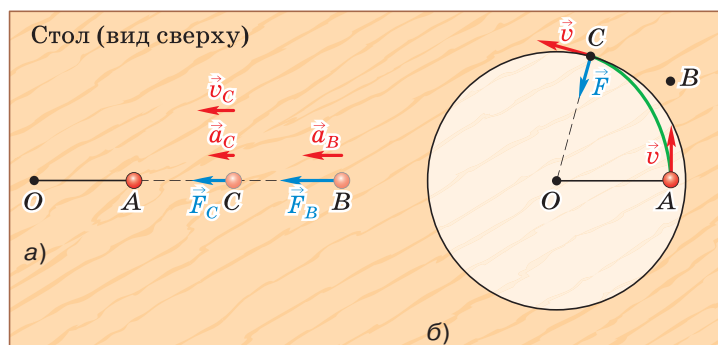
■ Проведите исследование, показывающее, что сила трения не зависит от площади соприкосновения тел.

Действие на тело силы в одних случаях может привести к изменению только *модуля вектора* скорости этого тела, а в других — к изменению *направления* скорости. Покажем это на примерах.

На рисунке 45, а изображён шарик, лежащий на столе в точке А. Шарик привязан к одному из концов резинового шнура. Второй конец шнура прикреплён к столу в точке О. Если шарик переместить в точку В, то шнур растянется. При этом в нём возникнет сила упругости \vec{F} , действующая на шарик и стремящаяся вернуть его в первоначальное положение. Если теперь отпустить шарик, то под действием силы \vec{F} он будет ускоренно двигаться к точке А. В данном случае *скорость шарика в любой точке траектории* (например, в точке С) *сонаправлена с силой упругости и ускорением*, возникшим в результате действия этой силы. При этом меняется только модуль вектора скорости шарика, а *направление вектора скорости остаётся неизменным*, и шарик движется *прямолинейно*.

Теперь рассмотрим пример, в котором под действием силы упругости шарик движется *криволинейно* (т. е. траектория его движения представляет собой кривую линию). На рисун-

Рис. 45. Если скорость тела и действующая на него сила направлены вдоль одной прямой, то тело движется прямолинейно, а если они направлены вдоль пересекающихся прямых, то тело движется криволинейно



ке 45, *б* изображён тот же шарик на резиновом шнуре, лежащий в точке *A*. Толкнём шарик к точке *B*, т. е. *придадим ему начальную скорость, направленную перпендикулярно отрезку OA*. Если бы на шарик не действовали никакие силы, то он сохранял бы величину и направление полученной скорости (вспомните явление инерции). Но, двигаясь к точке *B*, шарик удаляется от точки *O* и чуть-чуть растягивает шнур. Поэтому в шнуре возникает сила упругости \vec{F} , стремящаяся сократить его до первоначальной длины и одновременно приблизить шарик к точке *O*. В результате действия этой силы направление скорости шарика в каждый момент его движения немного меняется, поэтому он движется *по криволинейной траектории AC*. В любой точке траектории (например, в точке *C*) скорость шарика \vec{v} и сила \vec{F} направлены под углом друг к другу: скорость — по касательной к траектории, а сила — к точке *O*.

Рассмотренные примеры показывают, что действие на тело силы может привести к разным результатам в зависимости от направления векторов скорости и силы.

Если скорость тела и действующая на него сила направлены вдоль одной прямой, то тело движется прямолинейно, а если они направлены под углом друг к другу, то тело движется криволинейно.

Верно и обратное утверждение: если тело движется криволинейно, то это значит, что на него действует какая-то сила, меняющая направление скорости, причём в каждой точке сила и скорость направлены под углом друг к другу.

Существует бесчисленное множество различных криволинейных траекторий. Но часто кривые линии, например линия *ABCDEF* (рис. 46), могут быть приблизительно представлены в виде совокупности дуг окружностей разных радиусов.

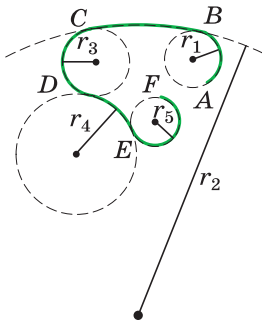


Рис. 46. Траектория *ABCDEF* может быть представлена в виде совокупности дуг окружностей разных радиусов



1. Рассмотрите рисунок 45, *а* и ответьте на вопросы: под действием какой силы шарик приобретает скорость и движется от точки *В* к точке *А*? В результате чего эта сила возникла? Как направлены ускорение, скорость шарика и действующая на него сила? По какой траектории движется шарик? **2.** Рассмотрите рисунок 45, *б* и ответьте на вопросы: почему в шнуре возникла сила упругости и как она направлена по отношению к шнуру? Что можно сказать о направлении скорости шарика и действующей на него силы упругости шнура? Как движется шарик — прямолинейно или криволинейно? **3.** При каком условии тело под действием силы движется прямолинейно, а при каком — криволинейно?



УПРАЖНЕНИЕ 19

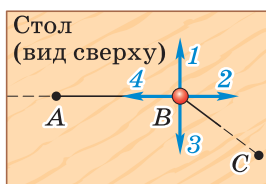


Рис. 47

1. Шарик катился по горизонтальной поверхности стола от точки *А* к точке *В* (рис. 47). В точке *В* на шарик подействовали силой \vec{F} . В результате он стал двигаться к точке *С*. В каком из направлений, обозначенных стрелками 1, 2, 3 и 4, могла действовать сила \vec{F} ?

2. На рисунке 48 изображена траектория движения шарика. На ней отмечены положения шарика через каждую секунду после начала движения. Действовала ли на шарик сила на участке 0—3; 4—6; 7—9; 10—12; 13—15; 16—19? Если сила действовала, то

как она была направлена по отношению к вектору скорости? Почему на участке 7—9 шарик повернул налево, а на участке 10—12 — направо по отношению к направлению движения перед поворотом? Сопротивление движению не учитывайте.

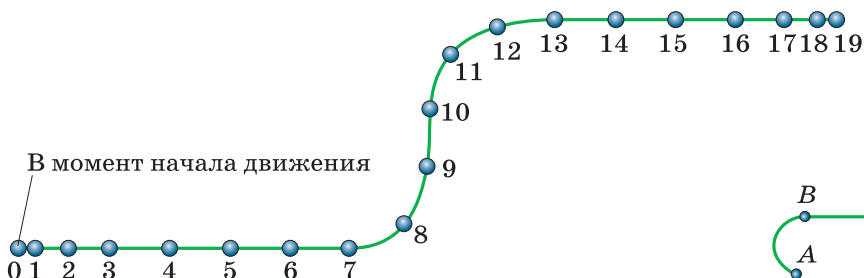


Рис. 48

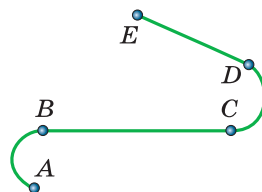


Рис. 49

3*. На рисунке 49 линией *ABCDE* изображена траектория движения некоторого тела. На каких участках на тело наверняка действовала сила? Могла ли на тело действовать какая-нибудь сила при его движении на других участках этой траектории? Все ответы обобщите.

Одним из простейших и весьма распространённых видов криволинейного движения является движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью. Введём величины, характеризующие это движение.

Число оборотов тела по окружности в единицу времени называют **частотой обращения**. Её обозначают греческой буквой ν («ню»). Единица частоты обращения — *секунда в минус первой степени* (с^{-1}):

$$\frac{1}{\text{с}} = \text{с}^{-1}.$$

Время, в течение которого тело совершает полный оборот, называют **периодом обращения**. Его обозначают буквой T и в СИ измеряют в *секундах* (с).

Если, например, за 1 с тело совершает 10 оборотов, то время одного оборота, или период обращения, составляет $\frac{1}{10}$ с. При ν оборотах в секунду период обращения

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

Если известен период обращения, легко найти и модуль скорости тела, движущегося по окружности. За время, равное периоду T , точка, движущаяся по окружности радиусом R , пройдёт путь, равный длине окружности $2\pi R$. Взяв отношение пути $2\pi R$ ко времени T , получим модуль скорости точки:

$$v = \frac{2\pi R}{T}.$$

Учитывая, что $T = \frac{1}{\nu}$, а значит, $\nu = \frac{1}{T}$,

$$v = 2\pi R\nu.$$

Как уже было сказано, мгновенная скорость тела в любой точке криволинейной траектории

$$T = \frac{1}{\nu}$$

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

$$v = 2\pi R\nu$$

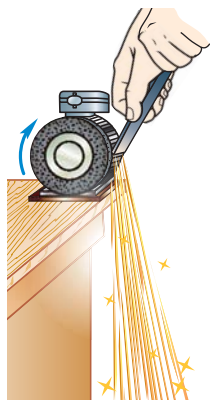


Рис. 50. Искры из-под стального прута, прижатого к вращающемуся точильному камню, летят по касательной к окружности в точке отрыва

направлена по касательной к траектории в этой точке. При движении по окружности скорость направлена по касательной к окружности. В этом можно убедиться на опыте.

Если к быстро вращающемуся точильному камню электроточила приложить стальной прут, то из-под него будут вырываться искры (рис. 50). Это мелкие раскалённые частицы стали и камня. После отрыва от камня эти частицы двигаются по инерции, поэтому прямолинейно со скоростью, равной скорости в момент отрыва.

Направление движения частиц, а значит, и вектор их скорости совпадает с касательной к окружности, по которой они двигались.

Напомним, что векторные величины характеризуются модулем и направлением. При изменении хотя бы одной из этих двух характеристик вектор меняется.

При движении тела по окружности *модуль вектора скорости* может меняться или оставаться постоянным, но *направление вектора скорости* обязательно меняется, т. е. вектор скорости тела, движущегося по окружности, является величиной переменной.

Значит, *движение по окружности всегда происходит с ускорением*.

Получить представление о направлении ускорения, с которым тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, можно по рисунку 51. На нём изображено тело (материальная точка), движущееся по окружности радиусом r . За очень малый промежуток времени Δt это тело переходит из точки A в точку B , которая расположена очень близко к точке A . При стремлении к нулю промежутка времени Δt точка B стремится к точке A , угол α — к нулю, а угол DBC — к 90° , т. е. при

$\Delta t \rightarrow 0$ вектор ускорения $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$, который

совпадает по направлению с вектором измене-

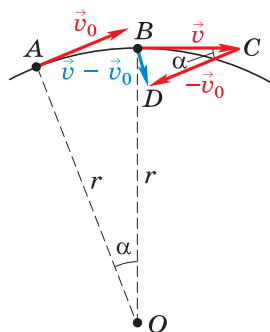


Рис. 51. Вектор центростремительного ускорения тела направлен вдоль радиуса к центру окружности

ния скорости $\vec{v} - \vec{v}_0$, направлен вдоль радиуса к центру окружности.


Пусть все участки траектории тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью, представляют собой дуги окружностей (см. рис. 46). Тогда ускорение тела в любой точке этой траектории будет направлено к центру соответствующей окружности.

Ускорение, с которым тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, в любой точке направлено по радиусу окружности к её центру. Поэтому его называют **центростремительным**.

$$a_{ц. с} = \frac{v^2}{r}$$

Модуль вектора центростремительного ускорения $a_{ц. с}$ тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью v по окружности радиусом r , определяется по формуле:


$$a_{ц. с} = \frac{v^2}{r}.$$

Покажем, как можно получить формулу для модуля центростремительного ускорения. 

Рассмотрим треугольники DBC и ABO (см. рис. 51). Они подобны, как равнобедренные с равными углами α при вершинах. Значит,

$$\frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{|\vec{v}|} = \frac{AB}{r}.$$

За малое время Δt тело совершает перемещение, модуль которого $AB = |\vec{v}| \Delta t$. Поэтому можно написать:

$$\frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{|\vec{v}|} = \frac{|\vec{v}| \Delta t}{r}, \text{ или } \frac{|\vec{v} - \vec{v}_0|}{\Delta t} = \frac{|\vec{v}|^2}{r}, \text{ или } |\vec{a}| = \frac{|\vec{v}|^2}{r}. $$

По второму закону Ньютона ускорение всегда сонаправлено с силой, в результате действия которой оно возникает.

Значит, и сила, под действием которой тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, в каждой точке направлена по радиусу окружности к её центру.

Пример. Автомобиль массой 2 т движется со скоростью 20 м/с по выпуклому участку эстакады радиусом 600 м. Определите вес автомобиля в верхней точке эстакады.

Дано:

$$m = 2 \text{ т}$$

$$v = 20 \text{ м/с}$$

$$R = 600 \text{ м}$$

$P = ?$

СИ

$$2 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

Решение:

Движение по выпуклому участку эстакады — это движение по окружности. Значит, автомобиль

движется с центростремительным ускорением. Установим, равнодействующая каких сил сообщает автомобилю это ускорение. На автомобиль в вертикальном направлении действуют сила тяжести и сила реакции опоры (рис. 52). По третьему закону Ньютона вес тела равен по модулю силе реакции опоры $P = N$.

Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N}.$$

Направим ось Y вертикально вниз и запишем это уравнение через проекции:

$$ma_{ц.с} = mg - N, \text{ где } a_{ц.с} = \frac{v^2}{R}.$$

Выразим искомую величину из уравнения

$$N = m\left(g - \frac{v^2}{R}\right).$$

$$P = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \left(10 \text{ м/с}^2 - \frac{400 \text{ м}^2/\text{с}^2}{600 \text{ м}}\right) = 18680 \text{ Н}.$$

Ответ: $P = 18680 \text{ Н}$.

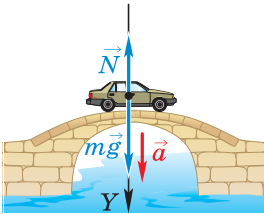


Рис. 52

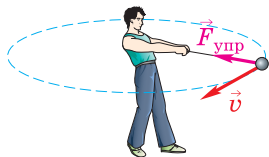


Рис. 53. Движение тела по окружности под действием силы упругости

Силы, сообщающие телу центростремительное ускорение, могут быть силами разной природы. Например, шар легкоатлетического молота движется по окружности под действием силы упругости троса (рис. 53); планеты обращаются вокруг Солнца, а спутники — вокруг планет под действием силы всемирного тяготения; автомобиль совершает поворот за счёт силы трения колёс о дорогу.

Под действием этих сил возникает ускорение, меняющее направление скорости тела, благодаря чему оно движется по окружности или её дуге.



- 1.** Что такое частота обращения; период обращения? **2.** Как связаны между собой период и частота обращения? **3.** Опишите опыт, с помощью которого можно убедиться в том, что мгновенная скорость тела, равномерно движущегося по окружности, в любой точке этой окружности направлена по касательной к ней. **4.** Как направлено ускорение тела при его движении по окружности с постоянной по модулю скоростью? Как называют это ускорение? **5.** По какой формуле можно вычислить модуль вектора центростремительного ускорения? **6.** Как направлена сила, под действием которой тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью?



- 1.** Почему самолёт при повороте наклоняется в сторону поворота, а корабль — в противоположную сторону?
- 2.** Почему на поворотах железной дороги машинист замедляет движение поезда?



УПРАЖНЕНИЕ 20

- 1.** Точильный камень радиусом 10 см делает 300 оборотов в минуту. Найдите скорость точек на ободе точильного камня.
- 2.** При работе стиральной машины в режиме отжима поверхность её барабана, находящаяся на расстоянии 21 см от оси вращения, движется вокруг этой оси со скоростью 20 м/с. Определите ускорение, с которым движутся точки поверхности барабана.
- 3.** Определите ускорение конца секундной стрелки часов, если он находится на расстоянии $R = 2$ см от центра вращения.
- 4.** Докажите, что ускорение движения крайней точки стрелки часов в 2 раза больше ускорения средней точки этой стрелки (т. е. точки, находящейся посередине между центром вращения стрелки и её концом).

- 5*. Минутная и секундная стрелки часов вращаются вокруг общего центра. Расстояния от центра вращения до концов стрелок одинаковы. Чему равно отношение ускорений, с которыми движутся концы стрелок? Какая стрелка движется с большим ускорением?
- 6*. Масса Земли равна $6 \cdot 10^{24}$ кг, а масса Луны — $7 \cdot 10^{22}$ кг. Считая, что Луна движется вокруг Земли по окружности радиусом 384 000 км, определите: а) силу притяжения между Землёй и Луной; б) центростремительное ускорение, с которым Луна движется вокруг Земли; в) модуль скорости движения Луны относительно Земли.
- 7*. Определите, с какой скоростью движется автомобиль массой 1 т по вогнутому мосту радиусом 100 м, если сила давления автомобиля на середину моста равна 15 кН.



§ 21

ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Обратимся ещё раз к рисунку 45, б. Если шарик толкнуть, а затем предоставить самому себе, то он опишет некоторую дугу и остановится. Причиной остановки шарика является действие на него силы трения и силы сопротивления воздуха, препятствующих движению и уменьшающих его скорость.

Если уменьшить действие тормозящих сил, то шарик может описать вокруг точки O одну или несколько окружностей, прежде чем остановится (при этом крепление шнура в точке O должно быть таким, чтобы оно не препятствовало движению шарика).

Если бы нам удалось устранить все силы сопротивления движению, то шарик бесконечно двигался бы вокруг точки O по замкнутой кривой, например по окружности. При этом направление скорости шарика непрерывно менялось бы под действием силы, направленной к центру окружности.

Примером подобного движения служит обращение планет вокруг Солнца и спутников вокруг планет.

Рассмотрим более детально вопрос о запуске и движении искусственных спутников Земли (сокращенно ИСЗ).

Чтобы понять, при каких условиях тело может стать искусственным спутником Земли,



Земля, окружённая ИСЗ и так называемым космическим мусором

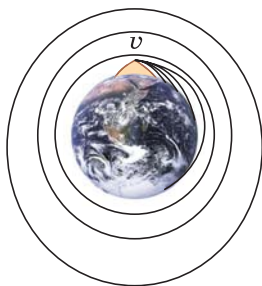


Рис. 54. Копия рисунка Ньютона

рассмотрим рисунок 54. Он представляет собой копию рисунка, сделанного Ньютоном. На этом рисунке изображён земной шар, а на нём показана высокая гора, с вершины которой бросают камни, придавая им различные по модулю горизонтально направленные скорости.

В подписи Ньютона к рисунку говорится: «Брошенный камень отклонится под действием силы тяжести от прямолинейного пути и, описав кривую траекторию, упадёт, наконец, на Землю. Если его бросить с большой скоростью, то он упадёт дальше». Продолжая эти рассуждения, Ньютон приходит к выводу, что при отсутствии сопротивления воздуха и при достаточно большой скорости тело вообще может не упасть на Землю, а будет описывать круговые траектории, оставаясь на одной и той же высоте над Землёй. Такое тело становится искусственным спутником Земли.

Движение спутника является примером свободного падения, так как происходит только под действием силы тяжести. Но спутник не падает на Землю благодаря тому, что обладает достаточно большой скоростью, направленной по касательной к окружности, по которой он движется. Так, естественный спутник Земли Луна (рис. 55) обращается вокруг планеты около четырёх миллиардов лет.

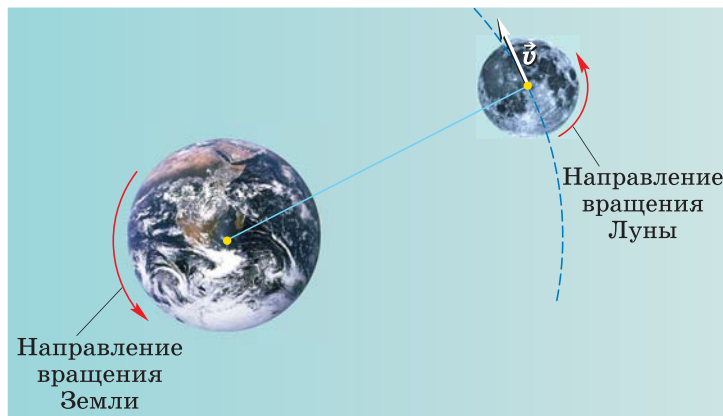


Рис. 55. Обращение Луны вокруг Земли является примером свободного падения

Значит, для того чтобы некоторое тело стало искусственным спутником Земли, его нужно вывести за пределы земной атмосферы и придать ему определённую скорость, направленную по касательной к окружности, по которой оно будет двигаться.

Наименьшая высота над поверхностью Земли, на которой сопротивление воздуха практически отсутствует, составляет примерно 300 км. Поэтому обычно спутники запускают на высоте 300—400 км от земной поверхности.

Выведем формулу для расчёта скорости, которую надо сообщить телу, чтобы оно стало искусственным спутником Земли.

Движение спутника происходит под действием только силы тяжести. Эта сила сообщает ему ускорение свободного падения g , которое в данном случае является центростремительным.

$$v = \sqrt{gr}$$

Центростремительное ускорение определяется по формуле: $a_{ц.с} = \frac{v^2}{r}$.

Значит, для спутника

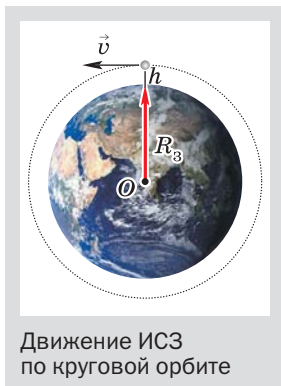
$$g = \frac{v^2}{r}, v^2 = gr,$$

$$v = \sqrt{gr}.$$

По этой формуле определяется скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно обращалось по окружности вокруг Земли на расстоянии r от её центра.

Эту скорость называют *первой космической скоростью (круговой)*.

Если высота h спутника над поверхностью Земли мала по сравнению с земным радиусом, то ею можно пренебречь и считать, что $r \approx R_3$. Обозначим ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли g_0 .



Тогда формула для расчёта первой космической скорости спутника, движущегося вблизи поверхности Земли, будет выглядеть так:

$$v = \sqrt{g_0 R_3}.$$

Рассчитаем эту скорость, принимая радиус Земли равным 6400 км (или $6,4 \cdot 10^6$ м), а $g_0 = 9,8$ м/с².

$$v = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} \approx 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}.$$

Если же высотой h спутника над Землёй пренебречь нельзя, то расстояние r от центра Земли до спутника и ускорение свободного падения g на высоте h определяются по следующим формулам:

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}$$

$$r = R_3 + h, \quad g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}.$$

В этом случае формула для расчёта первой космической скорости примет вид:

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2} (R_3 + h)},$$

или

$$v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}.$$

По этой формуле можно рассчитать первую космическую скорость спутника любой планеты, если вместо массы и радиуса Земли подставить соответственно массу и радиус данной планеты.

Из формулы следует, что чем больше высота h , на которой запускается спутник, тем меньшую скорость v ему нужно сообщить для его движения по круговой орбите (так как h стоит в знаменателе дроби). Например, на вы-



Первый искусственный спутник Земли

соте 300 км над поверхностью Земли первая космическая скорость приблизительно равна 7,8 км/с, а на высоте 500 км — 7,6 км/с.

Если скорость тела, запускаемого на высоте h над Землёй, превышает соответствующую этой высоте первую космическую, то его орбита представляет собой эллипс (см. рис. 54, внешнюю траекторию). Чем больше скорость, тем более вытянутой будет эллиптическая орбита. При скорости, равной 11,2 км/с, которую называют **второй космической скоростью**, тело преодолевает притяжение Земли и уходит в космическое пространство.

Для запуска спутников применяют ракеты. Двигатели ракеты должны совершить работу против сил тяжести и сил сопротивления воздуха, а также сообщить спутнику соответствующую скорость.

4 октября 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый в истории человечества искусственный спутник Земли. Спутник в виде шара диаметром 58 см и массой 83,6 кг и ракета-носитель долгое время двигались над Землёй на высоте в несколько сотен километров.

12 апреля 1961 г. первый в мире лётчик-космонавт, наш соотечественник **Юрий Алексеевич Гагарин** (1934—1968) совершил полёт в космос на космическом корабле «Восток».

В настоящее время сотни спутников запускаются каждый год в научно-исследовательских и практических целях: для осуществления теле- и радиосвязи, исследования атмосферы, прогнозирования погоды и т. д.



1. Приведите примеры (из области астрономии), доказывающие, что при отсутствии сил сопротивления тело может неограниченно долго двигаться по замкнутой траектории под действием силы, меняющей направление скорости движения этого тела.
2. Почему спутники, обращаясь вокруг Земли под действием силы тяжести, не падают на Землю?
3. Можно ли считать обращение спутника вокруг Земли свободным падением?
4. Что необходимо сделать с физическим телом, чтобы оно стало искусственным спутником Земли?
5. Выведите формулу для расчёта первой космической скорости спутника, движущегося

гося по круговой орбите вблизи поверхности Земли. **6.** Как движется спутник, обладающий первой космической скоростью; второй космической скоростью?



Почему тела внутри спутника, движущегося за пределами земной атмосферы, невесомы?



УПРАЖНЕНИЕ 21

1. Определите скорость искусственного спутника Земли, если он движется по круговой орбите на высоте 2600 км над поверхностью Земли. ($M_3 = 6 \cdot 10^{24}$ кг; $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м.)
2. Если бы на круговую орбиту вблизи поверхности Луны был выведен искусственный спутник, то он двигался бы со скоростью 1,67 км/с. Определите радиус Луны, если известно, что ускорение свободного падения на её поверхности равно $1,6 \text{ м/с}^2$.
3. На каком расстоянии от Земли сила всемирного тяготения, действующая на тело, будет в 3 раза меньше, чем на поверхности Земли?
4. Ракета, пущенная вертикально вверх, поднялась на высоту 3200 км и начала падать. Какой путь пройдёт ракета за первую секунду своего падения? Радиус Земли принять равным 6400 км.

§ 22

ИМПУЛЬС ТЕЛА. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Законы Ньютона позволяют решать различные практически важные задачи, касающиеся взаимодействия и движения тел. Большое число таких задач связано, например, с нахождением ускорения движущегося тела, если известны все действующие на это тело силы. А затем по ускорению определяют и другие величины (мгновенную скорость, перемещение).

Но часто бывает очень сложно определить действующие на тело силы. Поэтому для решения многих задач используют ещё одну важную физическую величину — *импульс тела*.

Импульсом тела \vec{p} называют векторную физическую величину, равную произведению массы тела на его скорость.

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Направление вектора импульса тела всегда совпадает с направлением вектора скорости движения.

За единицу импульса в СИ принимают импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с. Значит, единицей импульса тела в СИ является 1 кг · м/с.

При расчётах пользуются уравнением для проекций векторов:

$$p_x = mv_x.$$

В зависимости от направления вектора скорости по отношению к выбранной оси X проекция вектора импульса может быть как положительной, так и отрицательной.

Слово «импульс» (*impulsus*) в переводе с латинского означает «толчок». В некоторых книгах вместо термина «импульс» используется термин «количество движения».

Эта величина была введена в науку примерно в тот же период времени, когда Ньютоном были открыты законы, названные впоследствии его именем (т. е. в конце XVII в.).

При взаимодействии тел их импульсы могут изменяться. В этом можно убедиться на простом опыте.

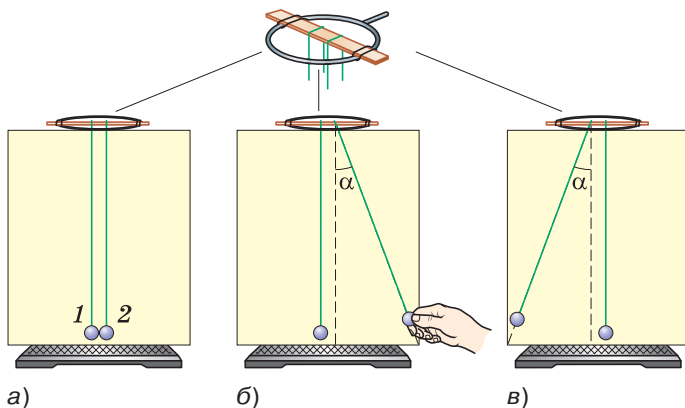
Два шарика одинаковой массы подвешивают на нитяных петлях к укрепленной на кольце штатива деревянной линейке, как показано на рисунке 56, а.

Шарик 2 отклоняют от вертикали на угол α (рис. 56, б) и отпускают. Вернувшись в прежнее положение, он ударяет по шарiku 1 и останавливается. При этом шарик 1 приходит в движение и отклоняется на тот же угол α (рис. 56, в).

В данном случае очевидно, что в результате взаимодействия шаров импульс каждого из них изменился: на сколько уменьшился импульс шара 2, на столько же увеличился импульс шара 1.

Если два или несколько тел взаимодействуют только между собой (т. е. не подвергаются

Рис. 56. Демонстрация закона сохранения импульса



воздействию внешних сил), то эти тела образуют *замкнутую систему*.

Импульс каждого из тел, входящих в замкнутую систему, может меняться в результате их взаимодействия друг с другом. Но

векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, не меняется с течением времени при любых движениях и взаимодействиях тел системы.

В этом заключается **закон сохранения импульса**.

Закон сохранения импульса выполняется и в том случае, если на тела системы действуют внешние силы, *векторная сумма которых равна нулю*. Покажем это, воспользовавшись для вывода закона сохранения импульса вторым и третьим законами Ньютона. Для простоты рассмотрим систему, состоящую только из двух тел — шаров массами m_1 и m_2 , которые движутся прямолинейно навстречу друг другу со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 57).

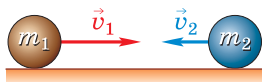


Рис. 57. Система из двух тел — шаров, движущихся прямолинейно навстречу друг другу

Силы тяжести, действующие на каждый из шаров, уравновешиваются силами реакции опоры, по которой они катятся. Значит, действие этих сил можно не учитывать. Силы сопротивления движению в данном случае малы, по-

этому их влияние мы тоже не будем учитывать. Таким образом, можно считать, что шары взаимодействуют только друг с другом.

Из рисунка 57 видно, что через некоторое время шары столкнутся. Во время столкновения, длящегося очень короткий промежуток времени t , возникнут силы взаимодействия \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , приложенные соответственно к первому и второму шару. В результате действия сил скорости шаров изменятся. Обозначим скорости шаров после соударения буквами \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 .

В соответствии с третьим законом Ньютона силы взаимодействия шаров равны по модулю и направлены в противоположные стороны:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

По второму закону Ньютона каждую из этих сил можно заменить произведением массы и ускорения, полученного каждым из шаров при взаимодействии:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2.$$

Ускорения, как вы знаете, определяются из равенств:

$$\begin{aligned}\vec{a}_1 &= \frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t}, \\ \vec{a}_2 &= \frac{\vec{v}'_2 - \vec{v}_2}{t}.\end{aligned}$$

Заменив в уравнении для сил ускорения соответствующими выражениями, получим:

$$m_1 \frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t} = -m_2 \frac{\vec{v}'_2 - \vec{v}_2}{t}.$$

В результате сокращения обеих частей равенства на t получим:

$$m_1(\vec{v}'_1 - \vec{v}_1) = -m_2(\vec{v}'_2 - \vec{v}_2),$$

или

$$m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 = -m_2 \vec{v}'_2 + m_2 \vec{v}_2.$$

Сгруппируем члены этого уравнения следующим образом:

$$m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2. \quad (1)$$

Учитывая, что $m\vec{v} = \vec{p}$, запишем уравнение (1) в таком виде:

$$\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2. \quad (2)$$

$$\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

Левые части уравнений (1) и (2) представляют собой суммарный импульс шаров после их взаимодействия, а правые — суммарный импульс до взаимодействия.

Значит, несмотря на то, что импульс каждого из шаров при взаимодействии изменился, векторная сумма их импульсов после взаимодействия осталась такой же, как и до взаимодействия.

Уравнения (1) и (2) являются математической записью закона сохранения импульса.

При рассмотрении взаимодействия тел, движущихся вдоль одной прямой, для записи закона сохранения импульса достаточно одного уравнения, в которое входят проекции векторных величин на ось X :

$$m_1 v'_{1x} + m_2 v'_{2x} = m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x}.$$

Пример. Два тела массами 2 и 4 кг движутся навстречу друг другу с одинаковой скоростью 2 м/с. После удара тела продолжили движение вместе. С какой скоростью и в каком направлении стали двигаться тела?

Дано:

$$m_1 = 2 \text{ кг}$$

$$m_2 = 4 \text{ кг}$$

$$v = v_1 = v_2 = 2 \text{ м/с}$$

$$v' = ?$$

Решение:

Будем считать тела материальными точками.

Инерциальную систему отсчёта свяжем с Землёй. Ось X направим в сторону движения тела большей массы.

Трения в системе нет, поэтому систему тел можно считать замкнутой.

Запишем закон сохранения импульса:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}'.$$

С учётом направления оси X закон сохранения импульса для проекций скоростей будет выглядеть так:

$$-m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'.$$

Мы предположили, что тела после столкновения стали двигаться в направлении, в котором двигалось тело большей массы до столкновения.

Выразим искомую величину:

$$v' = \frac{v(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2},$$

$$v' = \frac{2 \text{ м/с} \cdot (4 \text{ кг} - 2 \text{ кг})}{4 \text{ кг} + 2 \text{ кг}} \approx 0,7 \text{ м/с}.$$

Так как значение скорости получилось положительным, значит, предположение о направлении скорости верное.

Ответ: $v = 0,7 \text{ м/с}$, в направлении первоначального движения тела большей массы.



- 1.** Что называют импульсом тела? **2.** Что можно сказать о направлениях векторов импульса и скорости движущегося тела? **3.** Расскажите о ходе опыта, изображённого на рисунке 56. О чём он свидетельствует? **4.** Что означает утверждение о том, что несколько тел образуют замкнутую систему? **5.** Сформулируйте закон сохранения импульса. **6.** Для замкнутой системы, состоящей из двух тел, запишите закон сохранения импульса в виде уравнения, в которое входили бы массы и скорости этих тел. Поясните, что означает каждый символ в этом уравнении.



УПРАЖНЕНИЕ 22

- 1.** Две игрушечные заводные машины, массой по $0,2 \text{ кг}$ каждая, движутся прямолинейно навстречу друг другу. Скорость каждой машины относительно земли равна $0,1 \text{ м/с}$. Равны ли векторы импульсов машин; модули векторов импульсов? Определите проекцию импульса каждой из машин на ось X , параллельную их траектории.

2. На сколько изменится (по модулю) импульс автомобиля массой 1 т при изменении его скорости от 54 до 72 км/ч?
3. Человек сидит в лодке, покоящейся на поверхности озера. В какой-то момент он встаёт и идёт с кормы на нос. Что произойдёт при этом с лодкой? Объясните явление на основе закона сохранения импульса.
4. Железнодорожный вагон массой 35 т подъезжает к стоящему на том же пути неподвижному вагону массой 28 т и автоматически сцепляется с ним. После сцепки вагоны движутся прямолинейно со скоростью 0,5 м/с. Какова была скорость вагона массой 35 т перед сцепкой?

§ 23

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ. РАКЕТЫ

Рассмотрим несколько примеров, подтверждающих справедливость закона сохранения импульса.

Наверняка многие из вас наблюдали, как приходит в движение надутый воздухом воздушный шарик, если развязать нить, стягивающую его отверстие.

Объяснить это явление можно с помощью закона сохранения импульса.

Пока отверстие шарика завязано, шарик с находящимся внутри него сжатым воздухом покоится, и его импульс равен нулю.

При открытом отверстии из него с довольно большой скоростью вырывается струя сжатого воздуха. Движущийся воздух обладает некоторым импульсом, направленным в сторону его движения.

Согласно закону сохранения импульса, суммарный импульс системы, состоящей из двух тел — шарика и воздуха в нём, должен остаться таким же, каким был до начала истечения воздуха, т. е. равным нулю. Поэтому шарик начинает двигаться в противоположную струе воздуха сторону с такой скоростью, что его импульс равен по модулю импульсу воздушной струи. Векторы импульсов шарика и воздуха направлены в противоположные стороны. В результате суммарный импульс взаимодействующих тел остаётся равным нулю.

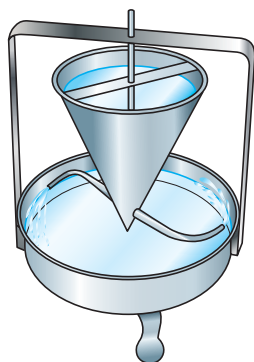


Рис. 58. Демонстрация реактивного движения с помощью сегнерова колеса

Движение шарика является примером **реактивного движения**. Реактивное движение происходит за счёт того, что от тела отделяется с некоторой скоростью какая-то его часть, в результате чего само тело приобретает противоположно направленный импульс.

На принципе реактивного движения основано вращение устройства, называемого *сегнеровым колесом* (рис. 58). Вода, вытекающая из сосуда конической формы через сообщающуюся с ним изогнутую трубку, вращает сосуд в направлении, противоположном скорости воды в струях. Следовательно, реактивное действие оказывает не только струя газа, но и струя жидкости.

Реактивное движение используют для своего перемещения и некоторые живые существа, например осьминоги, кальмары, каракатицы и другие головоногие моллюски (рис. 59). Двигаются они благодаря тому, что всасывают, а затем с силой выталкивают из себя воду. Существует даже разновидность кальмаров, которые с помощью своих «реактивных двигателей» могут не только плавать в воде, но и на короткое время вылетать из неё, чтобы поскорее настичь добычу или спастись от врагов.

Вы знаете, что принцип реактивного движения находит широкое практическое применение

Рис. 59. Реактивное движение для своего перемещения используют головоногие моллюски:
а — каракатица;
б — кальмар;
в — осьминог

а)



б)



в)





Старт ракеты-носителя с космическим кораблём «Союз»

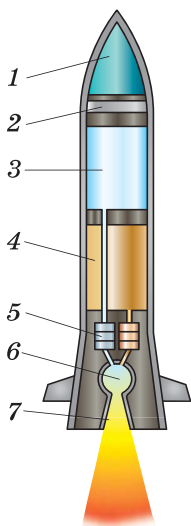


Рис. 60. Схема ракеты

ние в авиации и космонавтике. В космическом пространстве нет среды, с которой тело могло бы взаимодействовать и тем самым изменять направление и модуль своей скорости. Поэтому для космических полётов могут быть использованы только реактивные летательные аппараты, т. е. ракеты.

Рассмотрим вопрос об устройстве и запуске так называемых *ракет-носителей*, т. е. ракет, предназначенных для вывода в космос искусственных спутников Земли, космических кораблей, автоматических межпланетных станций и других полезных грузов.

В любой ракете, независимо от её конструкции, всегда имеется оболочка и топливо с окислителем. На рисунке 60 схематично изображена ракета в разрезе. Оболочка ракеты включает в себя полезный груз (в данном случае это космический корабль 1), приборный отсек 2 и двигатель (камера сгорания 6, насосы 5 и пр.).

Основную массу ракеты составляет топливо 4 с окислителем 3 (окислитель нужен для поддержания горения топлива, поскольку в космосе нет кислорода).

Топливо и окислитель с помощью насосов подаются в камеру сгорания. Топливо, сгорая, превращается в газ высокой температуры и высокого давления, который мощной струёй устремляется наружу через раструб специальной формы, называемый *соплóм* 7. Назначение сопла состоит в том, чтобы повысить скорость струи.

С какой целью увеличивают скорость выхода струи газа? Дело в том, что от этой скорости зависит скорость ракеты. Это можно показать с помощью закона сохранения импульса.

Для простоты рассуждений будем пока считать, что ракета представляет собой замкнутую систему (т. е. не будем учитывать действие на неё силы земного притяжения).

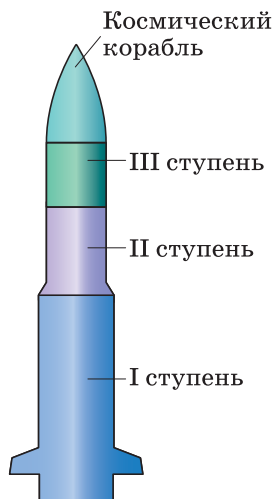


Рис. 61. Схема трёхступенчатой ракеты

Поскольку до старта импульс ракеты был равен нулю, то по закону сохранения суммарный импульс движущейся оболочки и выбрасываемого из неё газа тоже должен быть равен нулю. Отсюда следует, что импульс оболочки и направленный противоположно ему импульс струи газа должны быть равны по модулю. Значит, чем с большей скоростью вырывается газ из сопла, тем больше будет скорость оболочки ракеты.

Помимо скорости истечения газа существуют и другие факторы, от которых зависит скорость движения ракеты.

Мы рассмотрели устройство и принцип действия одноступенчатой ракеты, где под ступенью подразумевается та часть, которая содержит баки с горючим и окислителем и двигатель. В практике космических полётов обычно используют многоступенчатые ракеты, развивающие гораздо большие скорости и предназначенные для более дальних полётов, чем одноступенчатые.

На рисунке 61 показана схема трёхступенчатой ракеты. После того как топливо и окислитель первой ступени будут полностью израсходованы, эта ступень автоматически отбрасывается и в действие вступает двигатель второй ступени.

Уменьшение общей массы ракеты путём отбрасывания уже ненужной ступени позволяет экономить топливо и окислитель и увеличить скорость ракеты. Затем таким же образом отбрасывается вторая ступень.

Если возвращение космического корабля на Землю или его посадка на какую-либо другую планету не планируется, то третья ступень, как и две первых, используется для увеличения скорости ракеты. Если же корабль должен совершить посадку, то она используется для торможения корабля перед посадкой. При этом ракету разворачивают на 180° , чтобы



КОНСТАНТИН ЭДУАРДОВИЧ ЦИОЛКОВСКИЙ

(1857—1935)

Российский учёный и изобретатель в области аэродинамики, ракетодинамики, теории самолёта и дирижабля. Основоположник теоретической космонавтики



СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ КОРОЛЁВ

(1907—1966)

Советский учёный, конструктор ракетно-космических систем. Основатель практической космонавтики

сопло оказалось впереди. Тогда вырывающийся из ракеты газ сообщает ей импульс, направленный против скорости её движения, что приводит к уменьшению скорости и даёт возможность осуществить посадку.

Идея использования ракет для космических полётов была выдвинута в начале XX в. русским учёным и изобретателем **Константином Эдуардовичем Циолковским**. Циолковский разработал теорию движения ракет, вывел формулу для расчёта их скорости, был первым, кто предложил использовать многоступенчатые ракеты.

Полвека спустя идея Циолковская была развита и реализована советскими учёными под руководством **Сергея Павловича Королёва**.



1. Основываясь на законе сохранения импульса, объясните, почему воздушный шарик движется противоположно струе выходящего из него сжатого воздуха.
2. Приведите примеры реактивного движения тел.
3. Каково назначение ракет? Расскажите об устройстве и принципе действия ракеты.
4. От чего зависит скорость ракеты?
5. В чём заключается преимущество многоступенчатых ракет перед одноступенчатыми?
6. Как осуществляется посадка космического корабля?



УПРАЖНЕНИЕ 23

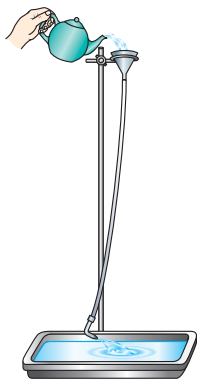


Рис. 62

1. С лодки, движущейся со скоростью 2 м/с, человек бросает весло массой 5 кг с горизонтальной скоростью 8 м/с противоположно движению лодки. С какой скоростью стала двигаться лодка после броска, если её масса вместе с человеком равна 200 кг?
2. Какую скорость получит модель ракеты, если масса её оболочки равна 300 г, масса пороха в ней 100 г, а газы вырываются из сопла со скоростью 100 м/с? (Считайте истечение газа из сопла мгновенным.)
3. На каком оборудовании и как проводится опыт, изображённый на рисунке 62? Какое физическое явление в данном случае демонстрируется, в чём оно заключается и какой физический закон лежит в основе этого явления?

Примечание: резиновая трубка была расположена вертикально до тех пор, пока через неё не начали пропускать воду.



ЗАДАНИЕ



- Прodelайте опыт, изображённый на рисунке 62. Когда резиновая трубка максимально отклонится от вертикали, перестаньте лить воду в воронку. Пока оставшаяся в трубке вода вытекает, наблюдайте, как будет меняться: а) дальность полёта воды в струе (относительно отверстия в стеклянной трубке); б) положение резиновой трубки. Объясните оба изменения.

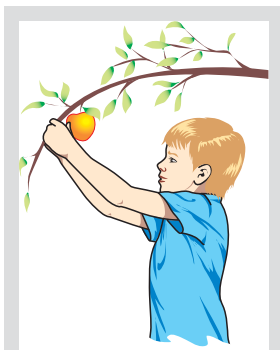
§ 24

РАБОТА СИЛЫ

Изучая механическое движение, мы ввели понятие импульса тела и познакомились с одним из фундаментальных физических законов — законом сохранения импульса. Однако не во всех случаях закон сохранения импульса пригоден для оценки изменения состояния тел. Например, после столкновения двух одинаковых свинцовых шаров, движущихся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями, шары останавливаются и, кроме того, их температура увеличивается. С помощью импульса нельзя охарактеризовать происходящее в данном случае «превращение» механического движения шаров в тепловое движение молекул. В 7 и 8 классах вы уже встречались с физической величиной, способной охарактеризовать подобное «превращение». Энергия — самая важная сохраняющаяся величина не только в механике, но и в физике вообще.

Прежде чем начать подробно говорить об энергии, необходимо остановиться на важной физической величине — *работе силы*, с которой энергия тесно связана.

Напомним, что работа совершается в процессе движения тела под действием приложенной к нему силы. Так, сила тяготения совершает работу при падении яблока с дерева. Одновременно совершает работу и сила сопротивления воздуха. Совершает работу и сила упругости, когда распрямляется согнутая мальчиком ветка дерева.



При сгибании мальчиком ветки яблони сила упругости совершает работу

Работа постоянной силы при прямолинейном движении тела — это физическая величина, равная произведению модулей силы, перемещения и косинуса угла между ними.

$$A = F s \cos \alpha.$$

Единицей работы в СИ является *джоуль* (Дж). За единицу работы принимают работу, которую совершает сила 1 Н на пути 1 м при условии, что угол между силой и перемещением $\alpha = 0^\circ$.

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$A = F s \cos \alpha$$

Работа силы может быть как положительной, так и отрицательной, в зависимости от знака косинуса угла между силой и перемещением. Если $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, то $\cos \alpha > 0$ и работа положительна (положительную работу совершает сила тяжести, действующая на санки, скатывающиеся с горы) (рис. 63, а). При $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ $\cos \alpha < 0$, и работа отрицательна (отрицательную работу совершает сила тяжести, действующая на санки, которые тянут в гору) (рис. 63, б). При $\alpha = 90^\circ$ $\cos \alpha = 0$ (сила перпендикулярна перемещению), работа не со-

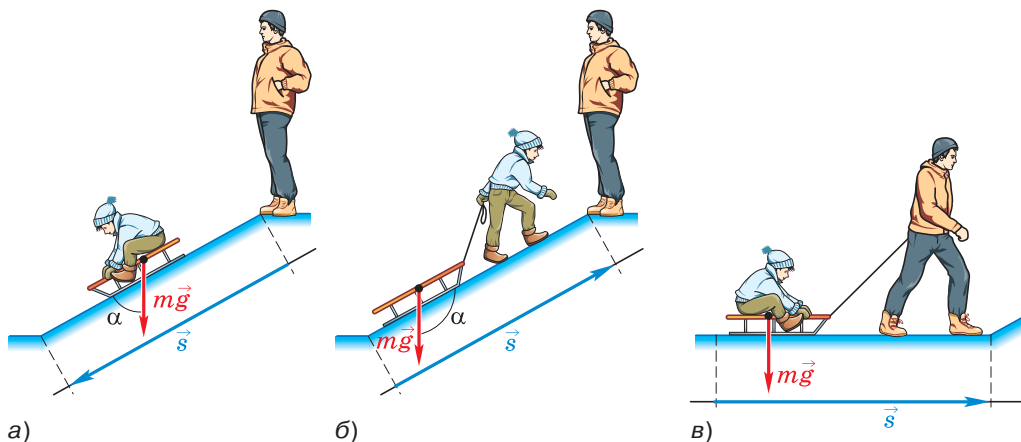


Рис. 63. Работа силы в зависимости от угла между силой и перемещением может быть: а — положительной; б — отрицательной; в — равной нулю

вершается. Так, сила тяжести не совершает работы при перемещении санок по горизонтальной дороге (рис. 63, в).

На практике чаще встречаются ситуации, когда движение тела не прямолинейное, а действующая на него сила изменяется. В таком случае для вычисления работы разбивают траекторию на малые участки, на каждом из которых силу можно считать постоянной, а сами участки прямолинейными. Работу вычисляют для каждого малого перемещения и суммируют результаты.

Рассмотрим два простых, но практически важных примера: рассчитаем работу силы тяжести и работу силы упругости.

Пусть шарик массой m падает с высоты h_1 на поверхность стола, находящуюся на уровне h_2 от пола (рис. 64, а). В каждой точке траектории сила тяжести, действующая на него, постоянна по модулю ($F_{\text{тяж}} = mg$) и по направлению (направлена вертикально вниз). Перемещение шарика $s = h_1 - h_2$. Тогда работа силы тяжести будет равна $A = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2$.

Теперь отпустим шарик с высоты h_1 по наклонной плоскости (рис. 64, б). Работа силы тяжести в этом случае равна $A = mgscos \alpha = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2$.

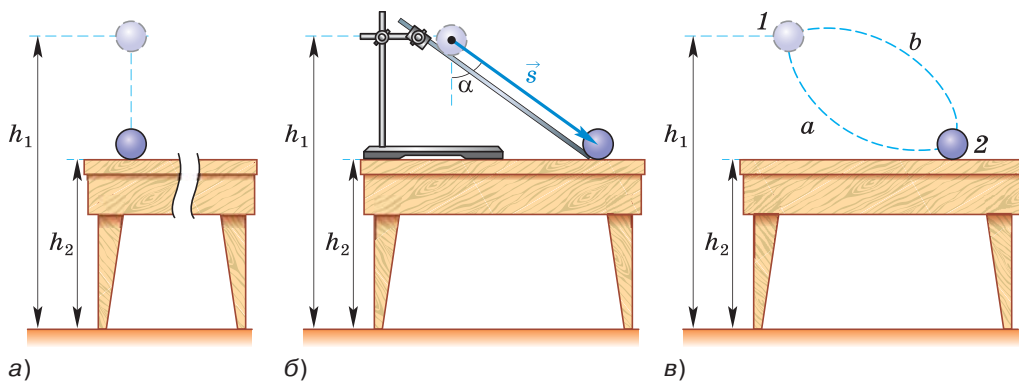


Рис. 64. Работа силы тяжести не зависит от формы траектории

$$A = mgh_1 - mgh_2$$

Если предоставить телу возможность двигаться из точки 1 в точку 2 по произвольной траектории (1a2 или 1b2, рис. 64, в), то и в этом случае, разбив траекторию на малые участки, можно доказать, что работа силы тяжести будет равна

$$A = mgh_1 - mgh_2.$$

Таким образом, *работа силы тяжести не зависит от формы траектории.*

Для работы можно дать наглядное графическое представление. Пусть тело совершает перемещение \vec{s} в направлении действия постоянной силы \vec{F} . График зависимости модуля силы от модуля перемещения показан на рисунке 65. Площадь закрашенного прямоугольника $S = Fs$, что численно равно работе, которую совершила сила F , переместив тело на расстояние s : $A = Fs$.

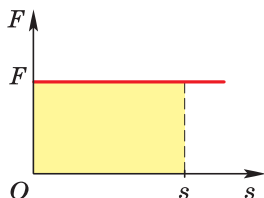


Рис. 65. Если направления постоянной силы и перемещения совпадают, работа силы численно равна площади прямоугольника со сторонами s и F

Обратимся к более сложному случаю, когда сила, действующая на прямолинейно движущееся тело, изменяется по модулю. Применив тот же приём, что и при вычислении перемещения тела при прямолинейном равноускоренном движении (см. § 7), можно доказать, что и в этом случае работа силы численно равна площади фигуры, ограниченной графиком $F(s)$, осью абсцисс и перпендикулярами, восстановленными из точек, соответствующих координатам тела. Воспользуемся этим обстоятельством для вычисления работы силы упругости.

Пусть горизонтально расположенная сжатая пружина жёсткостью k одним концом прикреплена к стене, а другим — к грузу, лежащему на гладком горизонтальном столе (рис. 66). Какую работу совершит сила упругости при уменьшении деформации пружины от x_1 до x_2 ($x_1 > x_2$)?

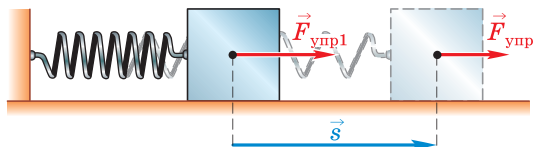


Рис. 66. При уменьшении деформации пружины сила упругости совершает работу

В первоначальном положении пружина сжата на вели-

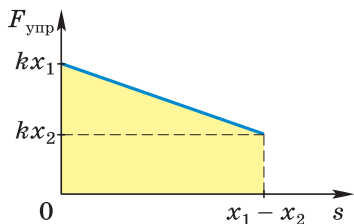


Рис. 67. Работа силы упругости равна площади прямоугольной трапеции с основаниями kx_1 , kx_2 и высотой $x_1 - x_2$

чину x_1 и модуль силы упругости, действующей на груз, равен $F_{\text{упр1}} = kx_1$. Когда под действием пружины груз переместится на расстояние s , деформация пружины уменьшится до x_2 и модуль силы упругости будет равен $F_{\text{упр}} = k(x_1 - s)$. Построив график зависимости $F_{\text{упр}}(s)$, получим прямую, проходящую через точки $(0; kx_1)$ и $(x_1 - x_2; kx_2)$.

Искомая работа будет равна площади закрашенной трапеции (рис. 67):

$$A = \frac{kx_1 + kx_2}{2}(x_1 - x_2) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Если деформация пружины изменяется от x_1 до x_2 , работа силы упругости определяется выражением:

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Можно доказать, что данное выражение для работы силы упругости справедливо независимо от того, по какой траектории движется конец пружины между начальным и конечным положениями. Таким образом, сила упругости обладает тем же свойством, что и сила тяжести: её работа не зависит от формы траектории.

Если тело или система тел могут совершить работу, то говорят, что они обладают энергией.

Пример. Мальчик тянет санки за верёвку с силой 60 Н. Верёвка образует с горизонтом угол 60° . Какую работу совершит мальчик, переместив санки на 300 м?

Дано:

$$F = 60 \text{ Н}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$s = 300 \text{ м}$$

$$A = ?$$

Решение:

Так как санки движутся поступательно, будем считать их материальной точкой. Систему отсчёта свяжем с Землёй.

Запишем выражение для работы силы F :

$$A = F \cos \alpha.$$

$$A = 60 \text{ Н} \cdot 300 \text{ м} \cdot 0,5 = 900 \text{ Дж}.$$

Ответ: $A = 900 \text{ Дж}$.



1. Что называют работой силы? **2.** В каких случаях работа силы положительна; отрицательна; равна нулю? Приведите примеры. **3.** Как определить работу изменяющейся силы? **4.** Чему равна работа силы тяжести? **5.** Чему равна работа силы упругости при растяжении пружины на величину $\Delta x = x_2 - x_1$? **6*.** Покажите на конкретных примерах, что работа силы зависит от выбора системы отсчёта.



Перемещая груз с помощью неподвижного блока, человек выполняет работу, хотя иногда прилагает силу перпендикулярно направлению движения груза. Объясните кажущееся противоречие.



УПРАЖНЕНИЕ 24

- 1.** Сплавщик передвигает багром бревно, прилагая к багру силу 20 Н. Какую работу совершит сплавщик, переместив бревно на 3 м, если угол между направлением силы и перемещения 45° .
- 2.** Вычислите работу, которую совершила лошадь, везущая сани массой 300 кг на расстояние 3 км. Коэффициент трения металла о снег равен 0,02. Движение считать равномерным.
- 3.** Мальчик растягивает пружину на 5 см и совершает при этом работу 1,25 Дж. Определите жёсткость пружины.

§ 25

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

В предыдущем параграфе мы выяснили, что поднятое над землёй тело, а также деформированная пружина способны совершить работу. При этом работа силы тяжести и силы упругости не зависит от формы траектории тела, а определяется только его начальным и конечным положениями. Такие силы называют *консервативными*. *Работа консервативных сил по замкнутой траектории равна нулю.*

Работа консервативных сил равна взятому с обратным знаком изменению величины, которую называют **потенциальной энергией**. Так, в случае силы тяжести работа равна изме-

нению с обратным знаком величины $E_{\text{п}} = mgh$ ($A = mgh_1 - mgh_2$). Это и есть *потенциальная энергия взаимодействия тела с Землёй* вблизи её поверхности. Она равна произведению массы тела на ускорение свободного падения и высоту над поверхностью Земли. Можно записать:

$$A = E_{\text{п}1} - E_{\text{п}2} = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}) = -\Delta E_{\text{п}}.$$

$$E_{\text{п}} = mgh$$

При совершении силой тяжести положительной работы (при падении тела) потенциальная энергия системы убывает вследствие уменьшения высоты. При движении же тела вверх работа силы тяжести отрицательна, а потенциальная энергия возрастает.

Как мы показали ранее, работа силы упругости определяется изменением с обратным зна-

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$$

ком величины $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} \left(A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} \right)$. Зна-

чит, *потенциальная энергия упруго деформи-*

рованной пружины $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$, где x — величина

деформации (растяжения или сжатия), k — жёсткость пружины.

И, так же как для работы силы тяжести, можно записать

$$A = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}) = -\left(\frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} \right) = -\Delta E_{\text{п}}.$$

Обратим внимание на то, что уравнение $A = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1})$ определяет потенциальную энергию $E_{\text{п}}$ неоднозначно. Если мы добавим к ней любую постоянную величину, то работа не изменится, так как не изменится разность потенциальных энергий. Только эта разность имеет физический смысл. Ни одно явление в природе или технике не определяется значением самой потенциальной энергии.

При решении конкретной задачи мы можем произвольно выбрать «нулевой уровень» — состояние системы, в котором её потенциальная энергия будет считаться равной нулю.

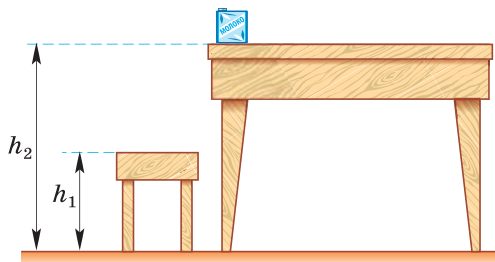


Рис. 68. Потенциальная энергия зависит от выбора нулевого уровня

Так, потенциальную энергию пакета молока (системы пакет молока — Земля) можно определить относительно пола, относительно табурета или стола (рис. 68). Если за нулевой уровень принять уровень пола, потенциальная энергия пакета молока будет равна $E_{\text{п}} = mgh_2$, если отсчитывать потенциальную энергию от уровня табуре-

та, то $E_{\text{п}} = mg(h_2 - h_1)$, а если от уровня стола, то $E_{\text{п}} = 0$. При этом работа $A = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}}$, которую совершит сила тяжести при падении пакета молока на пол, не будет зависеть от выбора нулевого уровня.

Иначе обстоит дело с силой трения. Эта сила не является консервативной, её работа зависит от формы траектории тела. Сравним работу силы тяжести и работу силы трения при движении санок по замкнутой траектории: санки съехали с горы, а потом их опять втащили на горку на прежнюю высоту. В этом случае работа силы тяжести равна нулю ($A = mgh - mgh$), а работа силы трения отлична от нуля, так как отрицательна и при движении санок вниз, и при их движении вверх.

Мы познакомились с потенциальной энергией — величиной, которая определяется взаимным положением взаимодействующих тел. Но тела могут обладать энергией (способны совершить работу) не только потому, что они занимают определённое положение, но и потому, что движутся.

Так, катящийся шар способен сжать пружину, движущийся молоток — забить гвоздь, летящая пуля — пробить доску. Во всех этих случаях совершается работа, а скорости тел (шара, молотка, пули) уменьшаются.

Вычислим работу постоянной силы \vec{F} , действующей на тело массой m , в случае, когда те-

ло движется прямолинейно в направлении действия силы.

Предположим, что в течение некоторого времени t тело прошло путь s , а его скорость возросла от значения v_1 до v_2 . В данном случае пройденный телом путь равен модулю перемещения, поэтому сила F совершает работу, равную $A = Fs$. Согласно второму закону Ньютона, $F = ma$. Из кинематики известно, что при равноускоренном движении $s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$. Подставив

в формулу работы выражения для силы и перемещения, после несложных преобразований получим:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Работа силы \vec{F} равна изменению некоторой величины, равной половине произведения массы тела на квадрат его скорости. Эту величину называют **кинетической энергией тела**

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Оказывается, полученное соотношение остаётся справедливым и в том случае, когда переменная по модулю и направлению сила действует на криволинейном участке траектории. Более того, результат может быть обобщён и на случай произвольной системы тел (материальных точек). Под кинетической энергией системы тел понимают сумму кинетических энергий тел, из которых эта система состоит.

$$A = E_{k2} - E_{k1}$$

Суммарная работа всех сил (как внешних, так и внутренних), действующих на систему тел, равна изменению кинетической энергии этой системы.

$$A = E_{k2} - E_{k1}.$$

Это утверждение называют **теоремой об изменении кинетической энергии**.

Если силы совершают положительную работу $A > 0$, то $E_{к2} > E_{к1}$, т. е. кинетическая энергия системы увеличивается. Если же суммарная работа действующих на систему сил отрицательна $A < 0$, то $E_{к2} < E_{к1}$ — кинетическая энергия системы уменьшается.



1. Какую энергию называют потенциальной? 2. От чего зависит значение потенциальной энергии тела, поднятого над землёй? 3. По какой формуле можно рассчитать энергию сжатой пружины? 4. Почему потенциальную энергию называют энергией взаимодействия? 5. Какую энергию называют кинетической? 6. Сформулируйте теорему об изменении кинетической энергии.



УПРАЖНЕНИЕ 25

1. На балконе лежат мяч массой 300 г и гантель массой 1 кг. Какое тело обладает большей потенциальной энергией относительно поверхности земли?
2. Кинетическая энергия какого автомобиля больше: грузового или легкового?
3. Пружину динамометра сжали на 2 см. Определите потенциальную энергию пружины, если её жёсткость 120 Н/м.
4. Брусok подняли с земли на высоту 2 м. На сколько изменилась его энергия, если масса бруска 700 г?
5. Пуля массой 3 г пробила деревянную плиту. Определите работу силы трения, если скорость пули изменилась от 400 до 100 м/с.

§ 26

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрим, как изменяется энергия тел, взаимодействующих только друг с другом. Такие системы, как вы уже знаете, называют замкнутыми.

Пусть замкнутая система такова, что помимо консервативных сил (тяготения и упругости) между телами действуют ещё и неконсервативные силы (например, силы трения). При изменении положения тел системы консервативные силы совершают работу

$$A_{\text{кc}} = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}},$$

где $E_{п1}$ и $E_{п2}$ — соответственно начальное и конечное значения потенциальной энергии системы.

Обозначим через $A_{нкс}$ суммарную работу, совершаемую за рассматриваемый промежуток времени неконсервативными силами. Согласно теореме об изменении кинетической энергии

$$A_{кс} + A_{нкс} = E_{к2} - E_{к1},$$

где $E_{к1}$ и $E_{к2}$ — соответственно начальное и конечное значения кинетической энергии системы.

Значит, $E_{п1} - E_{п2} + A_{нкс} = E_{к2} - E_{к1}$, откуда

$$(E_{к2} + E_{п2}) - (E_{к1} + E_{п1}) = A_{нкс}.$$

Сумму кинетической и потенциальной энергии системы называют **механической энергией системы**. Полученное равенство выражает **закон изменения механической энергии**:

изменение механической энергии замкнутой системы тел равно работе неконсервативных сил, действующих внутри системы.

Если же неконсервативные силы отсутствуют, то, очевидно, изменение механической энергии системы равно нулю. Отсюда вытекает **закон сохранения механической энергии**:

механическая энергия замкнутой системы тел остаётся постоянной, если между телами системы действуют только консервативные силы.

$$E_{к1} + E_{п1} = E_{к2} + E_{п2}.$$

$$\begin{aligned} E_{к1} + E_{п1} &= \\ &= E_{к2} + E_{п2} \end{aligned}$$

Потенциальная и кинетическая энергия замкнутой системы, в которой действуют только консервативные силы, могут изменяться, преобразуясь друг в друга. При уменьшении энергии одного вида на столько же увеличивается энергия другого вида, благодаря чему их сумма остаётся неизменной.

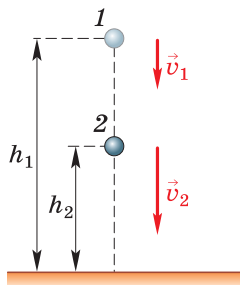


Рис. 69. Свободное падение шарика на землю с некоторой высоты

Посмотрим, как запишется закон сохранения механической энергии для случая свободного падения вблизи поверхности земли маленького стального шарика. В замкнутой системе тел шарик — Земля (влиянием других тел на систему пренебрегаем) механическая энергия сохраняется, поскольку внутри системы действуют силы тяготения (консервативные силы). Пусть на высоте h_1 (рис. 69) шарик массой m имеет скорость \vec{v}_1 относительно Земли, а на высоте h_2 — скорость \vec{v}_2 . Тогда для кинетической и потенциальной энергии системы в положениях шарика 1 и 2 получим:

$$E_{к1} = \frac{mv_1^2}{2}, E_{п1} = mgh_1,$$

$$E_{к2} = \frac{mv_2^2}{2}, E_{п2} = mgh_2.$$

Закон сохранения энергии запишется следующим образом:

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

При падении шарика вниз под действием силы тяжести его скорость увеличивается, а расстояние от шарика до поверхности земли уменьшается. Согласно закону сохранения механической энергии, кинетическая энергия системы тел шарик — Земля возрастает на ту же величину, на какую уменьшается её потенциальная энергия.

Если в системе действуют силы трения, механическая энергия не сохраняется, а уменьшается. Однако это не означает, что энергия исчезает бесследно. Происходит преобразование механической энергии во внутреннюю, что приводит к нагреванию трущихся тел.

Рассмотрим применение закона сохранения механической энергии для решения задач.

Пример 1. Яблоко массой 200 г падает с дерева с высоты 3 м. Какой кинетической энергией оно будет обладать на высоте 1 м от земли?

Дано: $m = 200 \text{ г}$ $h_1 = 3 \text{ м}$ $h_2 = 1 \text{ м}$ $v_1 = 0$ $g = 10 \text{ м/с}^2$ $E_{к2} — ?$	СИ $0,2 \text{ кг}$	Решение: Согласно закону сохранения механической энергии в замкнутой системе тел яблоко — Земля: $E_{п1} + E_{к1} = E_{п2} + E_{к2}$. Поскольку
--	-------------------------------	--

$$E_{к1} = \frac{mv_1^2}{2} = \frac{m \cdot 0}{2} = 0, \text{ то } E_{п1} = E_{п2} + E_{к2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{к2} = E_{п1} - E_{п2} = mgh_1 - mgh_2 = mg(h_1 - h_2).$$

$$E_{к2} = 0,2 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot (3 \text{ м} - 1 \text{ м}) = 4 \text{ Дж}.$$

Ответ: $E_{к2} = 4 \text{ Дж}$.

Пример 2. Мяч бросают вниз с высоты $h_1 = 1,8 \text{ м}$ со скоростью $v_1 = 8 \text{ м/с}$. На какую высоту h_2 отскочит мяч после удара о землю? (Потери энергии не учитывайте.)

Дано: $h_1 = 1,8 \text{ м}$ $v_1 = 8 \text{ м/с}$ $v_2 = 0$ $g = 10 \text{ м/с}^2$ $h_2 — ?$	Решение: Поскольку скорость отскочившего от земли мяча в момент его подъёма на максимальную высоту равна нулю, то по закону сохранения механической энергии в замкнутой системе тел мяч — Земля:
--	--

$$mgh_1 + \frac{mv_1^2}{2} = mgh_2.$$

Преобразуем уравнение и выразим h_2 :

$$m\left(gh_1 + \frac{v_1^2}{2}\right) = mgh_2 \Rightarrow h_2 = \frac{2gh_1 + v_1^2}{2g}.$$

$$h_2 = \frac{2 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 1,8 \text{ м} + 64 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 5 \text{ м}.$$

Ответ: $h_2 = 5 \text{ м}$.



1. Что называют механической энергией системы? **2.** В чём заключается закон изменения механической энергии? **3.** Сформулируйте закон сохранения механической энергии. Запишите его в виде уравнения. **4.** Может ли меняться с течением времени потенциальная или кинетическая энергия замкнутой системы?



УПРАЖНЕНИЕ 26

- 1.** Решите рассмотренную в параграфе задачу из примера 2 без использования закона сохранения механической энергии.
- 2.** Оторвавшаяся от крыши сосулька падает с высоты $h_0 = 36$ м от земли. Какую скорость v она будет иметь на высоте $h = 31$ м? (Принять $g = 10$ м/с².)
- 3.** Шарик вылетает из детского пружинного пистолета вертикально вверх с начальной скоростью $v_0 = 5$ м/с. На какую высоту от места вылета он поднимется? (Принять $g = 10$ м/с².)

ИТОГИ ГЛАВЫ

ОБСУДИМ? Ребята собрались поиграть в баскетбол. Андрей принёс мяч, Илья подержал мяч в руках и сказал, что его надо бы подкачать. Илья при этом заметил, что существуют стандарты для мяча, который падает с высоты 180 см свободно. Мяч должен после отскока подняться на высоту не менее 120 см и не более 160 см. Предложите схему эксперимента с использованием камеры смартфона, с помощью которого можно определить, соответствует ли мяч необходимым стандартам. Объясните, может ли мяч подскочить на высоту 180 см. Как с помощью того же оборудования определить, зависит ли высота отскока от давления воздуха внутри мяча?

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

- 1.** «Экспериментальное подтверждение справедливости условия криволинейного движения тел» (возможная форма: презентация, опыт).
- 2.** «История развития искусственных спутников Земли. Научно-исследовательские задачи, решаемые современными спутниками» (возможная форма: презентация, реферат).

§ 27

КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

С одним из видов неравномерного движения — равноускоренным — вы уже знакомы.

Рассмотрим ещё один вид неравномерного движения — *колебательное*.

Колебательные движения широко распространены в окружающей нас жизни. Примерами колебаний могут служить: движение качелей, маятника часов, вагона на рессорах и многих других тел.

На рисунке 70 изображены тела, которые могут совершать колебательные движения, если их вывести из положения устойчивого равновесия (т. е. отклонить или сместить от линии OO').

В движении этих тел можно найти много различий. Например, шарик на нити (рис. 70, а) движется криволинейно, а цилиндр на рези-

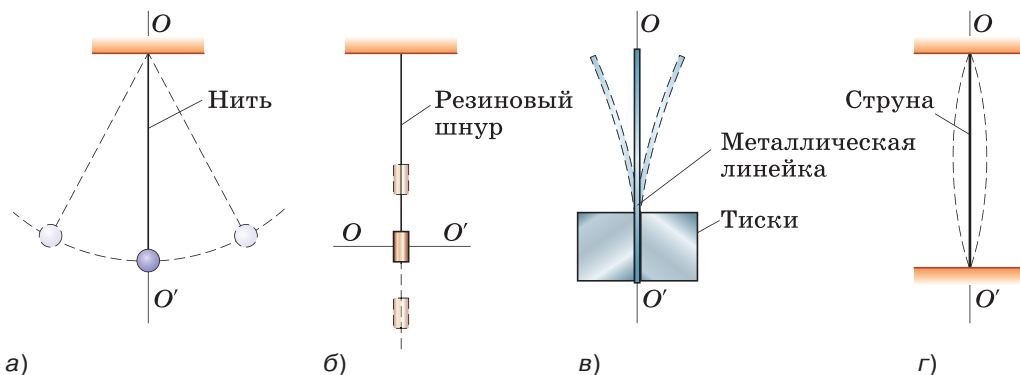


Рис. 70. Примеры тел, совершающих колебательные движения

новом шнуре (рис. 70, б) — прямолинейно; верхний конец линейки (рис. 70, в) колеблется с бóльшим размахом, чем средняя точка струны (рис. 70, г). За одно и то же время одни тела могут совершать большее число колебаний, чем другие.

Но при всём разнообразии этих движений у них есть важная общая черта: *движение любого из этих тел через некоторое время повторяется точно или почти точно.*

Действительно, если шарик отвести от положения равновесия и отпустить, то он, пройдя через положение равновесия, отклонится в противоположную сторону, остановится, а затем, пройдя второй раз через положение равновесия, вернётся к месту начала движения. За этим колебанием последует второе, третье и т. д., похожие на первое.

Повторяющимися будут и движения остальных тел, изображённых на рисунке 70.

Повторяющиеся во времени движения, при которых тело многократно проходит положение равновесия то в одну, то в другую сторону, называют механическими колебаниями.

Если движение тела повторяется через *равные* промежутки времени, то колебания называют *периодическими*. Наименьший промежуток времени, через который движение повторяется, называют *периодом колебаний*.

Именно такие колебания и будут предметом нашего изучения.

На рисунке 71 изображён шарик с отверстием, надетый на гладкую стальную струну и прикреплённый к пружине (другой конец которой закреплён неподвижно). Шарик может свободно скользить по струне, т. е. силы трения настолько малы, что не оказывают существенного влияния на его движение. Когда шарик находится в точке *О* (рис. 71, а), пружина

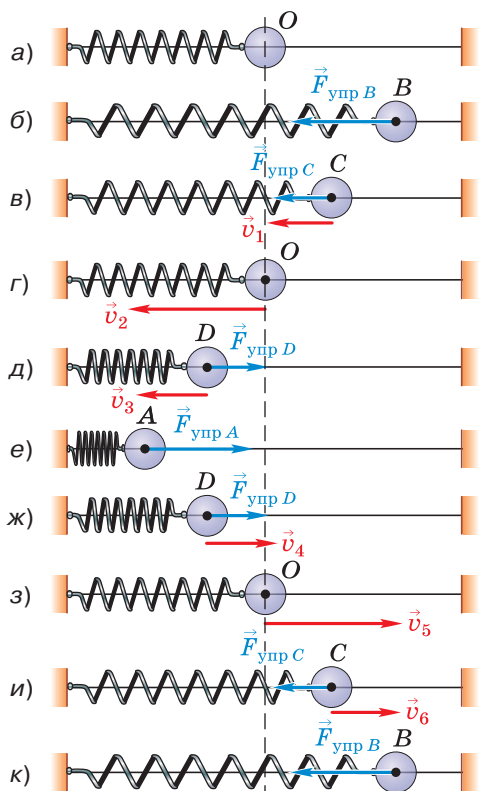


Рис. 71. Динамика свободных колебаний горизонтального пружинного маятника

не деформирована, поэтому никакие силы в горизонтальном направлении на него не действуют. Точка O — *положение равновесия шарика*.

Переместим шарик в точку B (рис. 71, б). Пружина при этом растянется, и в ней возникнет сила упругости $\vec{F}_{\text{упр } B}$. Эта сила пропорциональна *смещению* (т. е. отклонению шарика от положения равновесия) и направлена противоположно ему. Значит, при смещении шарика вправо действующая на него сила направлена влево, *к положению равновесия*.

Если отпустить шарик, то под действием силы упругости он начнёт ускоренно перемещаться влево, к точке O . Направление силы упругости и вызванного ею ускорения будет совпадать с направлением скорости шарика, поэтому по мере приближения шарика к точке O его скорость будет возрастать. При этом сила

упругости с уменьшением деформации пружины будет уменьшаться (рис. 71, в).

Напомним, что любое тело обладает свойством сохранять свою скорость, если на него не действуют силы или если равнодействующая сил равна нулю. Поэтому, дойдя до положения равновесия (рис. 71, г), где сила упругости станет равна нулю, шарик не остановится, а будет продолжать двигаться влево.

При его движении от точки O к точке A пружина будет сжиматься. В ней снова возникнет сила упругости, которая и *в этом случае будет направлена к положению равновесия*

(рис. 71, *д, е*). Поскольку сила упругости направлена против скорости движения шарика, то она тормозит его движение. В результате в точке *А* шарик остановится. Сила упругости, направленная к точке *О*, будет продолжать действовать, поэтому шарик вновь придёт в движение и на участке *АО* его скорость будет возрастать (рис. 71, *е, ж, з*).

Движение шарика от точки *О* к точке *В* снова приведёт к растяжению пружины, вследствие чего опять возникнет сила упругости, *направленная к положению равновесия* и замедляющая движение шарика до полной его остановки (рис. 71, *з, и, к*). Таким образом, шарик совершит одно полное колебание. При этом *в каждой точке его траектории (кроме точки О) на него будет действовать сила упругости, направленная к положению равновесия*.

Под действием силы, возвращающей тело в положение равновесия, тело может совершать колебания как бы само по себе. Первоначально эта сила возникла благодаря тому, что мы совершили работу по растяжению пружины, сообщив ей некоторый начальный запас энергии. За счёт этой энергии и происходили колебания.

Колебания, происходящие только благодаря начальному запасу энергии, называют свободными колебаниями.

Свободные колебания всегда происходят в результате взаимодействия тел, образующих систему тел, получившую название *колебательной системы*. В рассмотренном примере в колебательную систему входят шарик и пружина с закреплённым концом. В результате взаимодействия этих тел и возникает сила, возвращающая шарик к положению равновесия.

На рисунке 72 изображён шарик, который совершает свободные колебания под действием

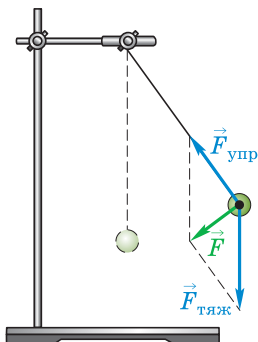


Рис. 72. Нитяной маятник

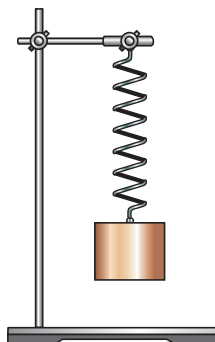


Рис. 73. Пружинный маятник

двух сил: силы тяжести и силы упругости нити. Их равнодействующая направлена к положению равновесия. Колебательная система в данном случае состоит из шарика, нити с закреплённым концом и Земли (Земля на рисунке не показана).

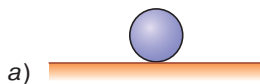
Системы тел, которые способны совершать свободные колебания, называют колебательными системами.

Одно из основных общих свойств всех колебательных систем заключается в наличии у них положения устойчивого равновесия. Тогда при выводе системы из положения равновесия возникают силы, стремящиеся вернуть её в это положение.

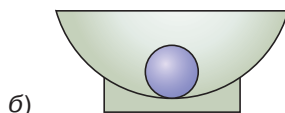
Рассмотренные колебательные системы называют *пружинным маятником* (см. рис. 71, 73) и *нитяным маятником* (см. рис. 72). Колебательное движение будем изучать в основном на примере этих систем.



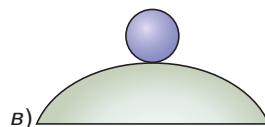
- 1.** Что называют механическими колебаниями? **2.** Пользуясь рисунком 71, объясните, почему по мере приближения шарика к точке *O* его скорость увеличивается, а по мере удаления от точки *O* скорость шарика уменьшается. **3.** Почему шарик не останавливается, дойдя до положения равновесия? **4.** Какие колебания называют свободными? **5.** Какие системы называют колебательными? Назовите общее свойство колебательных систем.



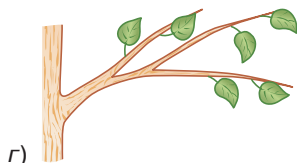
а) Шарик на горизонтальной поверхности



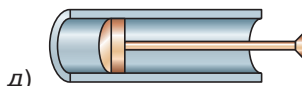
б) Шарик на дне чаши



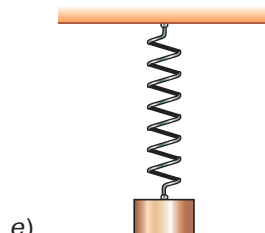
в) Шарик на выпуклой поверхности



г) Тонкая ветка дерева



д) Поршень в цилиндре



е) Пружинный маятник

Рис. 74



Какие системы (рис. 74) являются колебательными, а какие — нет? Какому требованию должна удовлетворять система тел, чтобы она являлась колебательной?



УПРАЖНЕНИЕ 27

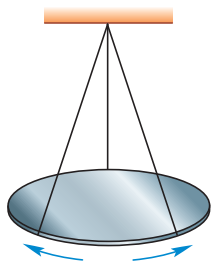


Рис. 75

1. На рисунке 75 изображён металлический диск, подвешенный на трёх резиновых шнурах. Если диск немного повернуть вокруг вертикальной оси и отпустить, то он будет в течение некоторого времени поворачиваться вокруг этой оси то по ходу часовой стрелки, то против. Объясните: а) под действием какой силы происходят колебания диска; б) возникла бы эта сила или нет, если бы диск не действовал на шнуры своим весом; в) какие тела входят в эту колебательную систему.
2. Что общего в колебательном движении подвешенного к нити груза (см. рис. 70, а) и движении по окружности шара легкоатлетического молота (см. рис. 53)? Чем отличаются эти движения?

§ 28

ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Сравним колебания двух одинаковых маятников, изображённых на рисунке 76. Первый маятник колеблется с большим размахом, т. е.

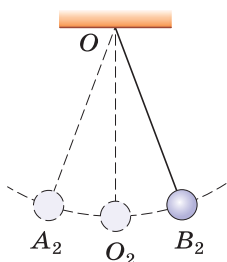
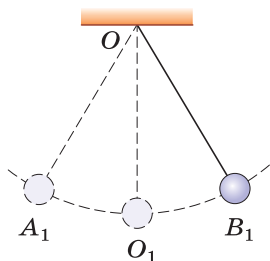


Рис. 76. Колебания маятников, происходящие с разной амплитудой

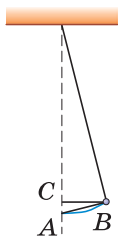


Рис. 77. При колебаниях с малой амплитудой длина дуги $\overset{\frown}{AB}$ равна отрезку AB

его крайние положения находятся дальше от положения равновесия, чем у второго маятника.

Наибольшее (по модулю) отклонение колеблющегося тела от положения равновесия называют амплитудой колебаний.

Будем рассматривать колебания, происходящие с малыми амплитудами (рис. 77), при которых длину дуги $\overset{\frown}{AB}$ можно считать равной длине отрезка AB и даже длине полухорды CB . Поэтому под амплитудой колебаний нитяного маятника можно понимать как дугу, так и любой из этих отрезков. Так, амплитуда колебаний первого маятника (см. рис. 76) равна O_1A_1 или O_1B_1 , а второго — O_2A_2 или O_2B_2 .

Амплитуду обозначают буквой A и измеряют в единицах длины — *метрах* (м), *сантиметрах* (см) и др. Амплитуду можно измерять также в единицах плоского угла, например в градусах, поскольку дуге окружности соответствует определённый центральный угол, т. е. угол с вершиной в центре окружности (в данном случае в точке O).

Амплитуда колебаний пружинного маятника (см. рис. 71) равна длине отрезка OB или OA .

Колеблющееся тело совершает одно полное колебание, если от начала колебаний проходит путь, равный четырём амплитудам. Например, переместившись из точки O_1 в точку B_1 , затем в точку A_1 и вновь в точку O_1 (см. рис. 76), шарик совершает одно полное колебание.

Промежуток времени, в течение которого тело совершает одно полное колебание, называют периодом колебаний.

Период колебаний, как и период обращения, обозначают буквой T и измеряют в *секундах* (с).

Подвесим два одинаковых шарика на нитях разной длины и приведём их в колебательное движение. Увидим, что за один и тот же промежуток времени короткий маятник совершит больше колебаний, чем длинный.

Число колебаний в единицу времени называют частотой колебаний.

Обозначается частота буквой ν . За единицу частоты принято одно колебание в секунду. Эта единица в честь немецкого учёного **Генриха Герца** (1857—1894) названа *герцем* (Гц).

Допустим, в одну секунду маятник совершает два колебания, т. е. частота его колебаний равна 2 Гц (или $2 \frac{1}{\text{с}}$). Чтобы найти период колебаний, необходимо одну секунду разделить на число колебаний в эту секунду, т. е. на частоту:

$$T = \frac{1}{\nu}$$

$$T = \frac{1}{2 \text{ Гц}} = \frac{1}{2 \frac{1}{\text{с}}} = 0,5 \text{ с.}$$

Таким образом, период колебаний T и частота колебаний ν связаны следующей зависимостью:

$$\nu = \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{1}{\nu},$$

или

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

Свободные колебания в отсутствие трения и сопротивления воздуха называют собственными колебаниями.

Оказывается, для большинства колебательных систем собственные колебания малой амплитуды происходят с частотой, зависящей только от параметров системы, но не зависящей от амплитуды колебаний. Эту частоту называют *собственной частотой колебательной системы*. Например, собственная частота пружинного маятника зависит от массы груза и жёсткости пружины.

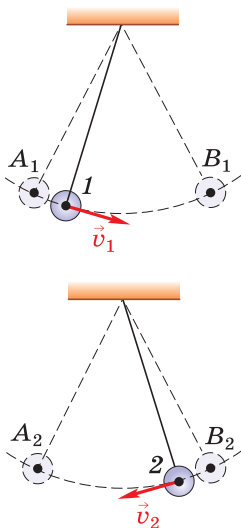


Рис. 78. Колебания маятников, происходящие в противоположных фазах

Рассмотрим колебания двух одинаковых маятников (рис. 78). В один и тот же момент времени верхний маятник из крайнего левого положения начинает движение вправо, а нижний маятник из крайнего правого положения движется влево. Оба маятника колеблются с одной и той же частотой (поскольку длины их нитей равны) и с одинаковыми амплитудами. Однако эти колебания отличаются друг от друга: *в любой момент времени скорости маятников направлены в противоположные стороны*. В таком случае говорят, что колебания маятников происходят в *противоположных фазах*.

Маятники, изображённые на рисунке 76, тоже колеблются с одинаковыми частотами. Скорости этих маятников в любой момент времени направлены одинаково. В этом случае говорят, что маятники колеблются в *одинаковых фазах*.

Рассмотрим ещё один случай. В момент, изображённый на рисунке 79, а, скорости обоих маятников направлены вправо. Но через некоторое время (рис. 79, б) они будут направлены в разные стороны. В таком случае говорят, что колебания происходят с определённой *разностью фаз*.

Физическая величина, называемая *фазой*, используется не только при сравнении колебаний двух или нескольких тел, но и для описания колебаний одного тела.

Формула для определения фазы в любой момент времени будет рассмотрена в старших классах.

Таким образом, *колебательное движение характеризуется амплитудой, частотой (или периодом) и фазой*.

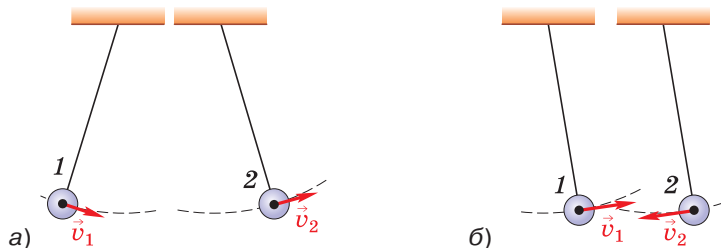


Рис. 79. Колебания маятников, происходящие с некоторой разностью фаз



1. Что называют амплитудой колебаний; периодом колебаний; частотой колебаний? В каких единицах измеряется каждая из этих величин?
2. Как связаны между собой период и частота колебаний?
3. Какие колебания называют собственными?
4. Что называют собственной частотой колебательной системы?



УПРАЖНЕНИЕ 28

1. На рисунке 80 изображены пары колеблющихся маятников. В каких случаях два маятника колеблются: в одинаковых фазах по отношению друг к другу; в противоположных фазах?

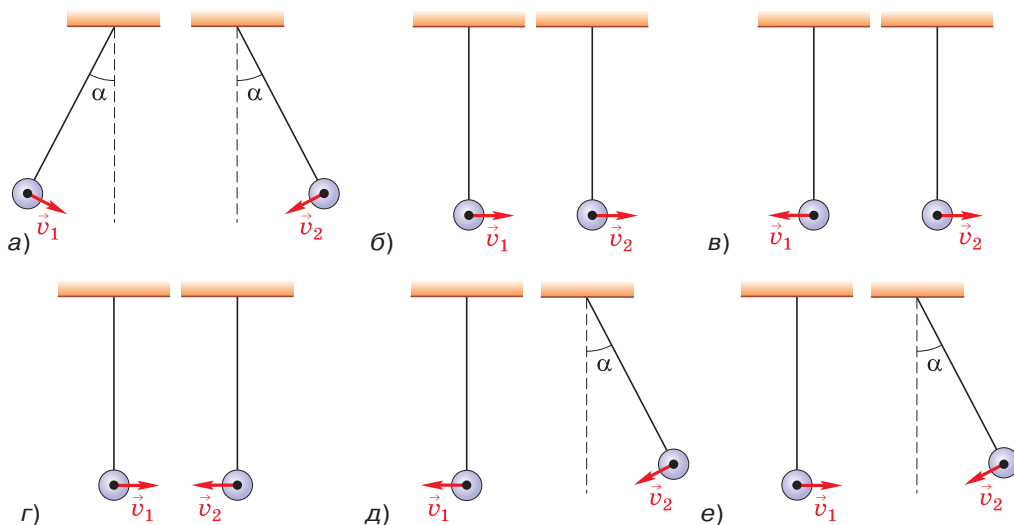


Рис. 80

2. Частота колебаний стометрового железнодорожного моста равна 2 Гц. Определите период этих колебаний.
3. Период вертикальных колебаний железнодорожного вагона равен 0,5 с. Определите частоту колебаний вагона.
4. Маятник совершает 30 колебаний в минуту. Определите период и частоту колебаний.
5. Амплитуда колебаний груза на пружине равна 3 см. Какой путь от положения равновесия пройдёт груз за время, равное $\frac{1}{4}T$; $\frac{1}{2}T$; $\frac{3}{4}T$; T ?
6. Амплитуда колебаний груза на пружине равна 10 см, частота 0,5 Гц. Какой путь пройдёт груз за 2 с?



ЗАДАНИЕ



- Изготовьте два одинаковых нитяных маятника. Проверьте, что при отклонении на один и тот же угол их периоды колебаний одинаковы. Уменьшите длину нити одного из маятников на 20% и определите, во сколько раз различаются периоды колебаний.

§ 29

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

В природе и технике широко распространены колебания, называемые **гармоническими**.

Гармоническими являются колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению колеблющейся точки и направленной противоположно этому смещению.

Вы уже знаете, что под действием такой силы происходят колебания пружинного маятника, поэтому при определённых условиях они могут служить примером гармонических колебаний (в частности, при условии, что на них не оказывает заметного влияния сила трения).

С помощью опыта, изображённого на рисунке 81, выясним, по какому закону меняется с течением времени координата колеблющегося пружинного маятника и как выглядит график этой зависимости.

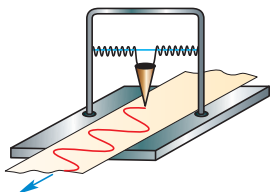


Рис. 81. Опыт по исследованию зависимости от времени координаты пружинного маятника, совершающего колебания

В данном опыте в качестве груза берут какой-нибудь небольшой массивный сосуд с маленьким отверстием снизу (например, воронку), а под него кладут длинную бумажную ленту. Сосуд с предварительно насыпанным в него песком (или налитой красящей жидкостью) приводят в колебательное движение. Если ленту перемещать с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний, то на ней останется волнообразная дорожка из песка, каждая точка которой соответствует положению колеблющегося груза в тот момент, когда он проходил над ней.

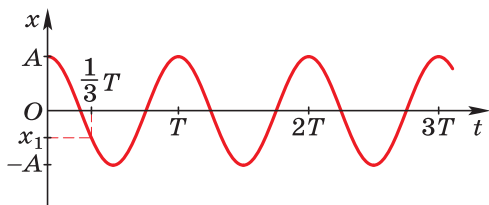


Рис. 82. График зависимости координаты колеблющегося пружинного маятника от времени

На рисунке 82 показан вид полученной кривой. Её называют **косинусоидой** (из курса математики старших классов вы узнаете о том, что аналогичные графики имеют функции типа $y = \sin x$ и $y = \cos x$ при переменной x). Через точки, соответствующие положению равновесия маятника, проведена

ось времени t , а перпендикулярно ей — ось смещения x .

Графиком зависимости координаты от времени при гармонических колебаниях является косинусоида (синусоида).

Из графика видно, что наибольшие отклонения груза от положения равновесия в обе стороны одинаковы по модулю и равны амплитуде колебаний A .

Маятник начал движение из крайней точки с координатой $x = A$. За время, равное периоду T , маятник совершил полное колебание, т. е., миновав положение равновесия, дошёл до противоположной крайней точки с координатой $x = -A$, изменил направление движения на противоположное и, вторично пройдя через положение равновесия, вернулся в то же самое место, откуда начал движение. Затем начинается следующее колебание и т. д.

Если в ходе опыта был измерен промежуток времени t , за который маятник совершил показанные на графике колебания, то можно определить их период T , разделив это время на число колебаний: $T = \frac{t}{N}$. Зная период, можно

найти частоту колебаний: $\nu = \frac{1}{T}$.

График даёт возможность приблизительно определить координату груза в любой момент времени. Например, через $\frac{1}{3}T$ от момента на-

чала первого колебания груз находился в точке с координатой x_1 .

Если график зависимости координаты от времени какого-нибудь тела представляет собой косинусоиду (синусоиду), т. е. если координата меняется со временем по закону косинуса (синуса), то говорят, что *и само тело, и координата совершают гармонические колебания*.

На рисунке 83 изображён опыт, аналогичный рассмотренному выше, только для нитяного маятника. С помощью этого опыта можно показать, что и для нитяного маятника график зависимости координаты от времени тоже представляет собой синусоиду, т. е. что его колебания являются гармоническими.

Теоретически колебания нитяного маятника были бы строго гармоническими в том случае, если бы он представлял собой материальную точку, колеблющуюся без трения с малой амплитудой¹ при не меняющемся со временем расстоянии от неё до точки подвеса. (Можно доказать, что при этих условиях сила, возвращающая точку в положение равновесия, будет прямо пропорциональна смещению, вследствие чего колебания будут происходить по гармоническому закону, т. е. по закону синуса или косинуса.)

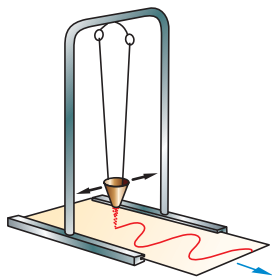


Рис. 83. Гармонические колебания нитяного маятника

Материальную точку, подвешенную на нерастяжимой невесомой нити, называют математическим маятником.

Итак, малые собственные колебания математического маятника являются гармоническими. Математический маятник — это абстрактная модель. Всякий реальный нитяной маятник представляет собой груз определённого размера на нити, которая деформируется при движении и имеет массу.

¹ В большинстве практических задач малой можно считать амплитуду, если угол отклонения не превышает 8° .

Практически колебания, близкие к гармоническим, совершает тяжёлый шарик (например, стальной), подвешенный на лёгкой и малорастяжимой нити, длина которой значительно больше диаметра этого шарика, при малой амплитуде и малом трении.

Голландский учёный *Христиан Гюйгенс* (1629—1695), исследуя законы колебания маятника, установил, что период малых собственных колебаний математического маятника зависит от длины маятника и ускорения свободного падения:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

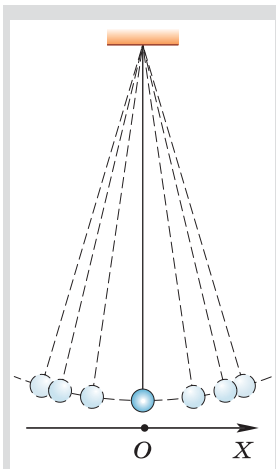
Чем больше длина нити маятника, тем больше период колебаний и меньше частота. (Эту зависимость вы будете исследовать при выполнении лабораторной работы № 4.)

Гармоническими являются малые собственные колебания пружинного маятника, если масса пружины мала по сравнению с массой груза. Период таких колебаний зависит от массы груза и жёсткости пружины:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

При совершении телом гармонических колебаний не только его координата, но и такие величины, как возвращающая сила, ускорение, скорость, тоже изменяются по закону синуса или косинуса. Это следует из законов, в которых указанные величины попарно связаны прямо пропорциональной зависимостью, на-

пример $F_x = -kx$ (закон Гука), $a_x = \frac{F_x}{m}$ (второй закон Ньютона). Из этих формул следует, что проекции силы и ускорения достигают наибольших по модулю значений, когда колеблющееся тело находится в крайних положениях.



$F_{x \max}$	$F_x = 0$	$-F_{x \max}$
$a_{x \max}$	$a_x = 0$	$-a_{x \max}$
$v = 0$	v_{\max}	$v = 0$

Динамика колебаний
математического
маятника

ниях, где смещение наиболее велико, и равны нулю, когда тело проходит через положение равновесия.

Скорость же, наоборот, в крайних положениях равна нулю, а при прохождении телом положения равновесия достигает наибольшего значения.



1. По рисункам 81 и 83 расскажите о цели, порядке выполнения и результатах изображённых опытов. **2.** Чему соответствуют отрезки OA и OT на графике (см. рис. 82)? **3.** Какие колебания называют гармоническими? **4.** Что представляет собой модель математического маятника? **5.** При каких условиях реальный нитяной маятник будет совершать колебания, близкие к гармоническим? **6.** Как меняются действующая на тело сила, его ускорение и скорость при совершении им гармонических колебаний? **7.** Как нужно изменить длину нити, чтобы увеличить период колебаний математического маятника? **8.** Заменив пружину в опыте по изучению колебаний пружинного маятника, мальчик получил период колебаний в 2 раза меньше. Что можно сказать о жёсткости второй пружины по сравнению с первой?



ЗАДАНИЕ



1. Спланируйте эксперимент с участием магнитных сил, имитирующих увеличение ускорения свободного падения и действующих на колеблющийся нитяной маятник. Проведите этот эксперимент и сделайте вывод о качественной зависимости периода колебаний от ускорения свободного падения.



2. Проведите исследование зависимости периода колебаний математического маятника от его массы.

Указание. Создавая модель маятника, возьмите одинаковые по объёму шарики из разных материалов, чтобы сила сопротивления была одинаковой.

§ 30

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Обратимся ещё раз к рисунку 71. Перемещая шарик из точки O (положения равновесия) в точку B , мы растягиваем пружину. При этом мы совершаем некоторую работу по преодолению силы упругости, благодаря чему пружина

жина приобретает потенциальную энергию. Если теперь отпустить шарик, то по мере его приближения к точке O деформация пружины и потенциальная энергия маятника будут уменьшаться, а скорость и кинетическая энергия — увеличиваться.

Допустим, что потери энергии на преодоление сил трения при движении маятника пренебрежимо малы. Тогда, согласно закону сохранения энергии, механическую энергию маятника (т. е. $E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$) в любой момент времени можно считать одинаковой и равной той потенциальной энергии, которую мы изначально сообщили пружине, растянув её на длину отрезка OB . При этом маятник мог бы совершать колебания сколь угодно долго с постоянной амплитудой, равной OB .

Так было бы, если бы при движении не было никаких потерь энергии.

Но реально потери энергии всегда есть. *Механическая энергия расходуется*, например, на совершение работы по преодолению сил сопротивления воздуха, *переходя при этом во внутреннюю энергию*. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается, и через некоторое время колебания прекращаются. Такие колебания называют **затухающими** (рис. 84).

Чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее прекращаются колебания. Например, в воде колебания затухают быстрее, чем в воздухе (см. рис. 84).

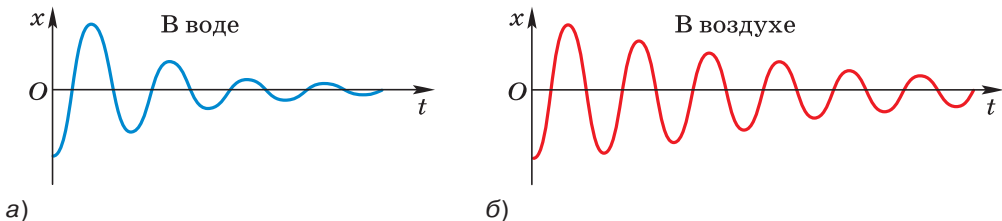


Рис. 84. Графики зависимости смещения от времени при свободных колебаниях, происходящих в воде и в воздухе

Свободные колебания всегда затухающие, так как весь запас энергии, первоначально сообщённый колебательной системе, в конце концов уходит на совершение работы по преодолению сил трения и сопротивления среды (т. е. механическая энергия переходит во внутреннюю).



Вынужденные колебания качелей

Чтобы колебания были незатухающими, необходимо восполнять потери энергии за каждый период колебаний. Это можно осуществить, воздействуя на колеблющееся тело периодически изменяющейся силой. Например, каждый раз подталкивая качели в такт их колебаниям, можно добиться того, чтобы колебания не затухали.

Колебания, совершаемые телом под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют вынужденными колебаниями.

Внешнюю, периодически изменяющуюся силу, вызывающую эти колебания, называют **вынуждающей силой**.

Если на покоящиеся качели начать действовать периодически меняющейся вынуждающей силой, то в течение некоторого времени амплитуда вынужденных колебаний качелей будет возрастать, т. е. амплитуда каждого последующего колебания будет больше, чем предыдущего. Увеличение амплитуды прекратится тогда, когда энергия, теряемая качелями на преодоление силы трения, станет равна энергии, получаемой ими извне (за счёт работы вынуждающей силы).

В большинстве случаев постоянная амплитуда вынужденных колебаний устанавливается не сразу, а спустя некоторое время после их начала.

Когда амплитуда вынужденных колебаний перестаёт меняться, говорят, что *колебания установились*.

Частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы.

Вынужденные колебания — *незатухающие*. Они происходят до тех пор, пока действует вынуждающая сила.



1. Что можно сказать о механической энергии колеблющегося маятника в любой момент времени, если допустить, что потерь энергии нет? Согласно какому закону это можно утверждать?
2. Как меняется с течением времени амплитуда свободных колебаний, происходящих в реальных условиях? В чём причина такого изменения?
3. Где быстрее прекратятся колебания маятника — в воздухе или в воде? Почему? (Начальный запас энергии в обоих случаях одинаков.)
4. Могут ли свободные колебания быть незатухающими? Почему? Что необходимо делать для того, чтобы колебания были незатухающими?
5. Что можно сказать о частоте установившихся вынужденных колебаний и частоте вынуждающей силы?
6. Как долго могут происходить вынужденные колебания?



УПРАЖНЕНИЕ 29

1. Горизонтальный пружинный маятник, изображённый на рисунке 71, отвели в сторону и отпустили. Как меняются перечисленные в таблице величины при движении маятника на указанных участках его пути? Перечертите таблицу в тетрадь и заполните её.

Направление движения маятника	Сила упругости $F_{\text{упр}}$	Скорость v	Потенциальная энергия $E_{\text{п}}$	Кинетическая энергия $E_{\text{к}}$	Механическая энергия $E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$	
					в реальных условиях (т. е. с трением)	в идеальных условиях (т. е. без трения)
От В к О						
От О к А						
От А к О						
От О к В						

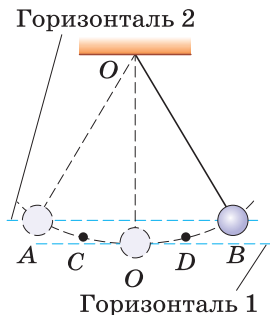


Рис. 85

2. На рисунке 85 изображён шарик на нити, колеблющийся без трения между точками A и B. Находясь в точке B, этот маятник обладает потенциальной энергией, равной 0,01 Дж относительно горизонтали 1, принятой за нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии. Чему равна: а) потенциальная энергия шарика в точках A и O; б) кинетическая энергия шарика в точках B, O и A; в) полная механическая энергия шарика в точках B, D, O, C и A?
3. Рассмотрите рисунок 74 и скажите, какие из тел способны совершать свободные колебания; вынужденные колебания. Ответ обоснуйте.



ЗАДАНИЕ



- Используя тонкие нити одинаковой длины и две гайки разной массы, сконструируйте два нитяных маятника. Определите экспериментально, колебания какого из них затухают быстрее. Объясните результат.

§ 31

РЕЗОНАНС

Приведём исторический факт, имеющий непосредственное отношение к теме данного параграфа.

В 1831 г. в Манчестере сильно раскачался и в результате этого обрушился Бротонский подвесной мост через реку Эруэлл, когда по нему проходил маршевым шагом (т. е. в ногу) небольшой отряд солдат.

Почему именно в описанном случае вынужденные колебания моста достигли такой большой амплитуды? Можно ли было предотвратить аварию?

Для ответа на эти вопросы рассмотрим, как зависит *амплитуда вынужденных колебаний от частоты изменения вынуждающей силы*.

На рисунке 86 изображены два маятника, висащие на общем шнуре. Длина маятника 2 неизменна, этой длине соответствует определённая частота свободных колебаний (т. е. собственная частота маятника). Длину маятника 1

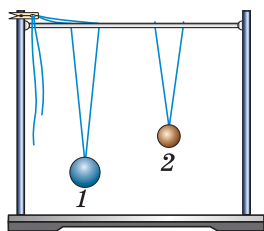


Рис. 86. Демонстрация зависимости амплитуды вынужденных колебаний маятников от частоты изменения вынуждающей силы

можно менять, подтягивая свободные концы нитей. При изменении длины маятника 1 соответственно меняется его собственная частота.

Если отклонить маятник 1 от положения равновесия и предоставить его самому себе, то он будет совершать свободные колебания. Это вызовет колебания шнура, в результате чего на маятник 2 через его точки подвеса будет действовать вынуждающая сила, периодически меняющаяся по модулю и направлению с такой же частотой, с какой колеблется маятник 1. Под действием этой силы маятник 2 начнёт совершать вынужденные колебания.

Если постепенно уменьшать длину маятника 1, то частота его колебаний, а значит, и частота изменения вынуждающей силы, действующей на маятник 2, будет увеличиваться, приближаясь к собственной частоте маятника 2. При этом амплитуда *установившихся вынужденных колебаний* маятника 2 будет возрастать. Она достигнет наибольшего значения, когда длины маятников сравняются, т. е. когда частота ν вынуждающей силы совпадёт с собственной частотой ν_0 маятника 2. Маятники будут колебаться в одинаковых фазах.

Дальнейшее уменьшение длины маятника 1 приведёт к тому, что частота вынуждающей силы станет больше собственной частоты маятника 2. При этом амплитуда его колебаний начнёт уменьшаться.

На основании этого опыта можно сделать следующий вывод: **амплитуда установившихся вынужденных колебаний достигает своего наибольшего значения при условии, что частота ν вынуждающей силы равна собственной частоте ν_0 колебательной системы.** В этом заключается явление, называемое **резонансом**.

Почему амплитуда установившихся колебаний, вызванных вынуждающей силой, достигает наибольшего значения именно при совпадении частоты изменения этой силы с собственной частотой колебательной системы? Дело в том,

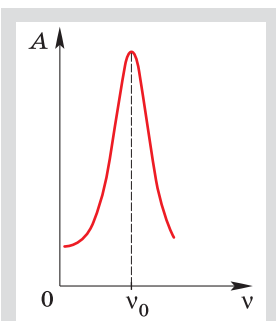


График зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы



При подталкивании качелей в направлении их движения энергия колебательной системы пополняется

что в этом случае направление вынуждающей силы в любой момент времени совпадает с направлением движения колеблющегося тела. Таким образом создаются наиболее благоприятные условия для пополнения энергии колебательной системы за счёт работы вынуждающей силы. Например, чтобы посильнее раскачать качели, мы подталкиваем их таким образом, чтобы направление действующей силы совпадало с направлением движения качелей.

Следует помнить, что понятие резонанса применимо только к вынужденным колебаниям.

Вернёмся теперь к случаю с обрушенным мостом. Очевидно, мост раскачался до большой амплитуды потому, что частота периодически действующей на него вынуждающей силы (идуших в ногу солдат) случайно совпала с собственной частотой этого моста. Авариию можно было бы предотвратить, если бы перед входом на мост была отдана команда идти не в ногу.

Резонанс играет большую роль в самых разнообразных явлениях, причём в одних — полезную, в других — вредную. Его необходимо учитывать, в частности, в тех случаях, когда с помощью наименьшей периодической силы нужно получить определённый размах вынужденных колебаний. Например, тяжёлый язык большого колокола можно раскачать, действуя сравнительно небольшой силой с частотой, равной собственной частоте языка. Но мы не достигнем желаемого результата, действуя с другой частотой (не в такт), даже прикладывая большую силу.

Примерами вредного проявления резонанса могут служить слишком сильное раскачивание железнодорожного вагона при случайном совпадении его собственной частоты колебаний на рессорах с частотой ударов колёс на стыках рельсов, сильное раскачивание пароходов на волнах и многие другие явления.

В тех случаях, когда резонанс может нанести ущерб, принимают меры к тому, чтобы не допустить его возникновения. Например, многие заводские станки, отдельные части которых совершают периодические движения, устанавливают на массивном фундаменте, препятствующем возникновению колебаний всего станка.



1. С какой целью и как проводился опыт с двумя маятниками, изображённый на рисунке 86? **2.** В чём заключается явление, называемое резонансом? **3.** К каким колебаниям — свободным или вынужденным — применимо понятие резонанса? **4.** Приведите примеры, показывающие, что в одних случаях резонанс может быть полезным явлением, а в других — вредным.



УПРАЖНЕНИЕ 30

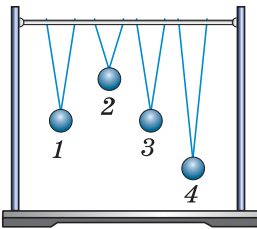


Рис. 87

- 1.** Маятник 3 (рис. 87) совершает свободные колебания.
 - а) Какие колебания — свободные или вынужденные — будут совершать при этом маятники 1, 2 и 4?
 - б) Каковы собственные частоты маятников 1, 2 и 4 по сравнению с частотой колебаний маятника 3?
 - в) Какой из маятников 1, 2 и 4 колеблется в резонанс с маятником 3? По каким признакам вы это определили?
- 2.** Вода, которую мальчик несёт в ведре, начинает сильно расплёскиваться. Мальчик меняет темп ходьбы (или просто «сбивает ногу»), и расплёскивание прекращается. Почему так происходит?
- 3.** Собственная частота качелей равна 0,5 Гц. Через какие промежутки времени нужно подталкивать их в одну сторону, чтобы раскачать как можно сильнее, действуя относительно небольшой силой?

§ 32

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В СРЕДЕ. ВОЛНЫ

Рассмотрим опыт, показанный на рисунке 88. Длинную пружину подвешивают на нитях. Ударяют рукой по её левому концу (рис. 88, а). От удара несколько витков пружины

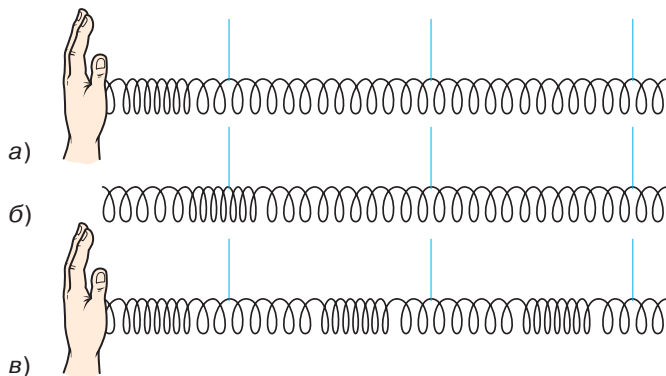


Рис. 88. Возникновение волны в пружине

ны сближаются, возникает сила упругости, под действием которой эти витки начинают расходиться. Как маятник проходит в своём движении положение равновесия, так и витки, минуя положение равновесия, будут продолжать расходиться. В результате в этом же месте пружины образуется уже некоторое разрежение (рис. 88, б). При ритмичном воздействии витки на конце пружины будут периодически то сближаться, то отходить друг от друга, совершая колебания возле своего положения равновесия. Эти колебания постепенно передадутся от витка к витку вдоль всей пружины. По пружине распространятся сгущения и разрежения витков, как показано на рисунке 88, в.

Другими словами, вдоль пружины от её левого конца к правому распространяется *возмущение*, т. е. изменение некоторых физических величин, характеризующих состояние среды. В данном случае это возмущение представляет собой изменение с течением времени силы упругости в пружине, ускорения и скорости движения колеблющихся витков, их смещения от положения равновесия.

Возмущения, распространяющиеся в пространстве, удаляясь от места их возникновения, называют волнами.

В данном определении речь идёт о так называемых *бегущих волнах*. Основное свойство бегущих волн любой природы заключается в том, что они, распространяясь в пространстве, переносят энергию.

Так, например, колеблющиеся витки пружины обладают энергией. Взаимодействуя с соседними витками, они передают им часть своей энергии, и вдоль пружины распространяется механическое возмущение (деформация), т. е. образуется бегущая волна.

Но при этом каждый виток пружины колеблется около своего положения равновесия, и вся пружина остаётся на первоначальном месте.

Таким образом, **в бегущей волне происходит перенос энергии без переноса вещества.**

В данной теме будем рассматривать только *упругие* бегущие волны, частным случаем которых является звук.

Упругие волны — это механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.

Иначе говоря, образование упругих волн в среде обусловлено возникновением в ней упругих сил, вызванных деформацией. Например, если по какому-нибудь металлическому телу ударить молотком, то в нём возникнет упругая волна.

Помимо упругих существуют и другие виды волн, например электромагнитные волны (см. § 48). Волновые процессы встречаются почти во всех областях физических явлений, поэтому их изучение имеет большое значение.

При возникновении волн в пружине колебания её витков происходили вдоль направления распространения волны в ней (см. рис. 88).

Волны, в которых колебания происходят вдоль направления их распространения, называют продольными волнами.

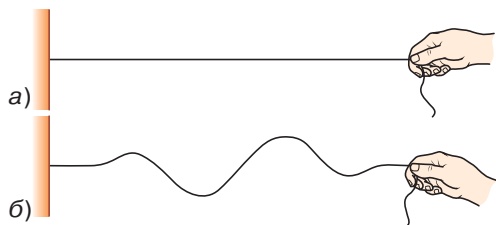


Рис. 89. Возникновение волн в шнуре

Кроме продольных волн существуют и *поперечные волны*. Рассмотрим такой опыт. На рисунке 89, а показан длинный резиновый шнур, один конец которого закреплён. Другой конец приводят в колебательное движение в вертикальной плоскости (перпендикулярно горизонтально расположенному шнуру).

Благодаря силам упругости, возникающим в шнуре, колебания будут распространяться вдоль шнура. В нём возникают волны (рис. 89, б), причём колебания частиц шнура происходят перпендикулярно направлению распространения волн.

Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения, называют поперечными волнами.

Движение частиц среды, в которой образуются как поперечные, так и продольные волны, можно наглядно продемонстрировать с помощью волновой машины (рис. 90). На рисунке 90, а показана поперечная волна, а на рисунке 90, б — продольная. Обе волны распространяются в горизонтальном направлении.

На волновой машине представлен только один ряд шариков. Но, наблюдая за их движением, можно понять, как распространяются волны в сплошных средах, протяжённых во всех трёх направлениях (например, в некото-

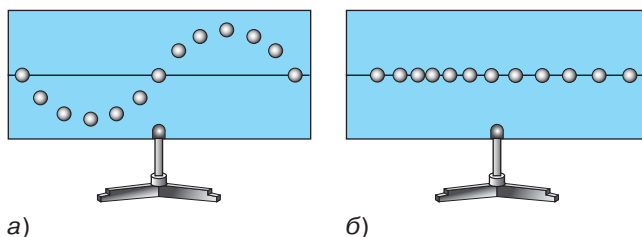


Рис. 90. Поперечная (а) и продольная (б) волны

ром объёме твёрдого, жидкого или газообразного вещества).

Для этого представьте себе, что каждый шарик является частью вертикального слоя вещества, расположенного перпендикулярно к плоскости рисунка. Из рисунка 90, а видно, что при распространении поперечной волны эти слои, подобно шарикам, будут *сдвигаться* друг относительно друга, совершая колебания в вертикальном направлении. Поэтому *поперечные механические волны являются волнами сдвига*.

А продольные волны, как видно из рисунка 90, б, — это волны сжатия и разрежения. В этом случае деформация слоёв среды состоит в изменении их плотности, так что продольные волны представляют собой чередующиеся уплотнения и разрежения.

Известно, что упругие силы при сдвиге слоёв возникают только в твёрдых телах. В жидкостях и газах смежные слои свободно скользят друг по другу без появления противодействующих упругих сил. Поэтому распространение поперечных волн в жидкостях и газах невозможно. Поперечные волны могут распространяться только в твёрдых телах.

При сжатии и разрежении (т. е. при изменении объёма участков тела) упругие силы возникают как в твёрдых телах, так и в жидкостях и газах. Поэтому продольные волны могут распространяться в любой среде — твёрдой, жидкой и газообразной.



1. Что называют волнами?
2. В чём заключается основное свойство бегущих волн любой природы? Происходит ли в бегущей волне перенос вещества?
3. Что такое упругие волны?
4. Приведите пример волн, не относящихся к упругим.
5. Какие волны называют продольными; поперечными? Приведите примеры.
6. Какие волны — поперечные или продольные — являются волнами сдвига; волнами сжатия и разрежения?
7. Почему поперечные волны не распространяются в жидких и газообразных средах?

Рассмотрим более подробно процесс передачи колебаний от точки к точке при распространении поперечной волны. Для этого обратимся к рисунку 91, на котором показаны различные стадии процесса распространения поперечной волны через промежутки времени, равные $\frac{1}{4}T$.

На рисунке 91, а изображена цепочка пронумерованных шариков. Это модель: шарики символизируют частицы среды. Будем считать, что между шариками, как и между частицами среды, существуют силы взаимодействия, в частности при небольшом удалении шариков друг от друга возникает сила притяжения.

Если привести первый шарик в колебательное движение, т. е. заставить его двигаться

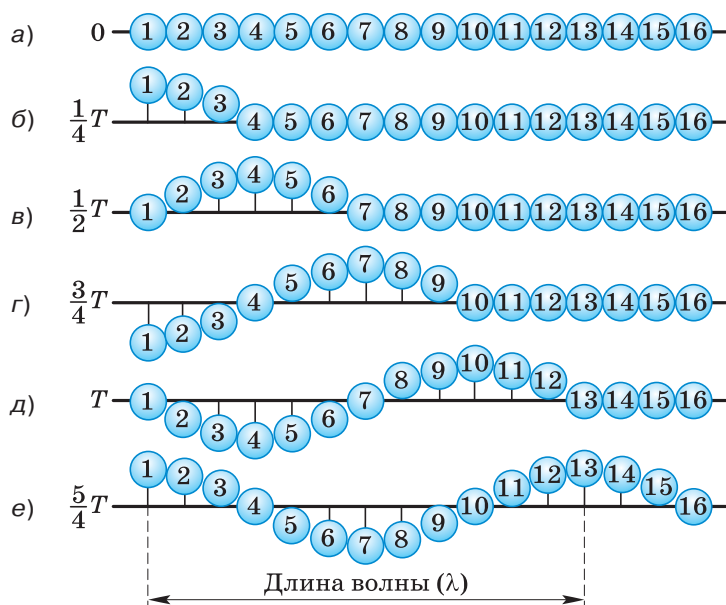


Рис. 91. Схема процесса распространения в пространстве поперечной волны

вверх и вниз от положения равновесия, то благодаря силам взаимодействия каждый шарик в цепочке будет повторять движение первого, но с некоторым запаздыванием (сдвигом фаз). Это запаздывание будет тем больше, чем дальше от первого шарика находится данный шарик. Так, например, видно, что четвёртый шарик отстаёт от первого на $\frac{1}{4}$ колебания (рис. 91, б). Ведь когда первый шарик прошёл $\frac{1}{4}$ часть пути полного колебания, максимально отклонившись вверх, четвёртый шарик только начинает движение из положения равновесия. Движение седьмого шарика отстаёт от движения первого на $\frac{1}{2}$ колебания (рис. 91, в), десятого — на $\frac{3}{4}$ колебания (рис. 91, г). Тринадцатый шарик отстаёт от первого на одно полное колебание (рис. 91, д), т. е. находится с ним в одинаковых фазах. Движения этих двух шариков совершенно одинаковы (рис. 91, е).

Расстояние между ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах, называют длиной волны.

Длина волны обозначается греческой буквой λ («ламбда»). Расстояние между первым и тринадцатым шариками (см. рис. 91, е), вторым и четырнадцатым, третьим и пятнадцатым и так далее, т. е. между всеми ближайшими друг к другу шариками, колеблющимися в одинаковых фазах, будет равно длине волны λ .

Из рисунка 91 видно, что колебательный процесс распространился от первого шарика до тринадцатого, т. е. на расстояние, равное длине волны λ , за то же время, за которое первый шарик совершил одно полное колебание, т. е. за период колебаний T .

Значит,

$$\lambda = vT,$$

$$\lambda = vT$$

где v — скорость волны.

Поскольку период колебаний связан с их частотой зависимостью $T = \frac{1}{\nu}$, то длина волны может быть выражена через скорость волны и частоту:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Таким образом, длина волны зависит от частоты (или периода) колебаний источника, порождающего эту волну, и от скорости распространения волны.

Из формул для определения длины волны можно выразить скорость волны:

$$v = \lambda \nu$$

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

и

$$v = \lambda \nu.$$

Формулы для нахождения скорости волны справедливы как для поперечных, так и для продольных волн.

Образование продольной волны можно представить с помощью рисунка 92. На нём изображена (в разрезе) труба с поршнем. Поршень совершает колебания с небольшой амплитудой вдоль трубы. Его движения передаются прилегающим к нему слоям воздуха, заполняющего

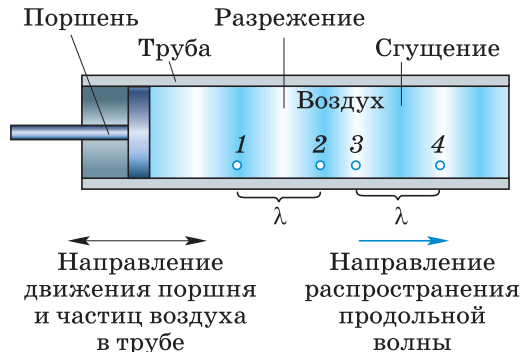


Рис. 92. Образование продольной волны в трубе при периодическом сжатии и разрежении воздуха поршнем

трубу. Колебательный процесс постепенно распространяется вправо, образуя в воздухе разрежения и сгущения. На рисунке даны примеры двух отрезков, соответствующих длине волны λ . Очевидно, что точки 1 и 2 являются ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах. То же самое можно сказать про точки 3 и 4.



1. Что называют длиной волны? **2.** За какое время колебательный процесс распространяется на расстояние, равное длине волны? **3.** По каким формулам можно рассчитать длину волны и скорость распространения поперечных и продольных волн? **4.** Расстояние между какими точками равно длине волны, изображённой на рисунке 92?



УПРАЖНЕНИЕ 31

1. С какой скоростью распространяется волна в океане, если длина волны равна 270 м, а период колебаний равен 13,5 с?
2. Определите длину волны при частоте 200 Гц, если скорость распространения волны равна 340 м/с.
3. Лодка качается на волнах, распространяющихся со скоростью 1,5 м/с. Расстояние между двумя ближайшими гребнями волн равно 6 м. Определите период колебаний лодки.

§ 34

ИСТОЧНИКИ ЗВУКА. ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Полученные знания о колебаниях и волнах позволяют нам перейти к рассмотрению звуковых явлений.

Мир окружающих нас звуков разнообразен — голоса людей и музыка, пение птиц и жужжание пчёл, гром во время грозы и шум леса на ветру, звук проезжающих автомобилей, самолётов и т. д. *Источниками звука* являются колеблющиеся тела, а распространение механических колебаний в пространстве — это механическая волна. Таким образом, *звук является механической волной*.

Рассмотрим различные источники звука.

На рисунке 93 изображена укреплённая в тисках упругая металлическая линейка. Если её свободную часть, длина которой подобрана



Рис. 93. Пример источника звука

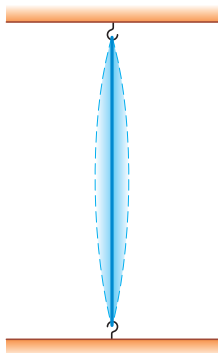


Рис. 94. Звучащая струна, концы которой закреплены, совершает колебания

определённым образом, привести в колебательное движение (крайние положения колеблющейся линейки показаны штриховыми линиями), то линейка будет издавать звук. В данном случае колебания источника звука очевидны.

Теперь обратимся к рисунку 94. На нём изображена звучащая струна, концы которой закреплены. Размытые очертания этой струны и кажущееся утолщение в середине свидетельствуют о том, что струна колеблется. Если к звучащей струне приблизить конец бумажной полоски, то полоска будет подпрыгивать от толчков струны. Пока струна колеблется, слышен звук; остановим струну, и звук прекращается.

Прибор, изображённый на рисунке 95, называют **камертоном**. Он представляет собой изогнутый металлический стержень на ножке. В данном случае камертон укреплён на резонаторном ящике (о назначении которого вы узнаете из § 37).

Заставим колебаться ножки камертона, ударив мягким молоточком или проведя по нему смычком. Мы услышим звук. Амплитуда и период колебаний ножек камертона малы, поэтому их движение трудно заметить. Чтобы обнаружить это движение, используем лёгкий шарик, подвешенный на нитке. Поднеся его к ножке звучащего камертона, увидим, что шарик отскакивает от неё. Значит, ножки камертона колеблются.

На рисунке 96 показано, как можно «записать» колебания камертона с малой (порядка

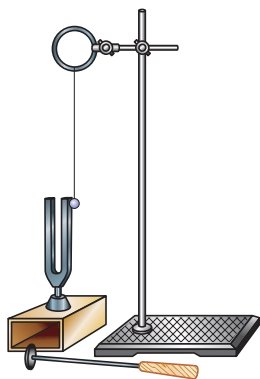


Рис. 95. Обнаружение колебаний ветвей звучащего камертона

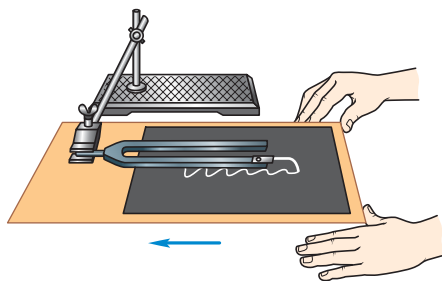


Рис. 96. Запись колебаний ветви камертона



Дельфины излучают и используют ультразвук для общения друг с другом: предупреждения сородичей об опасности, обнаружении косяков рыбы



Для летучих мышей ультразвук является средством обнаружения добычи



Медузы чувствуют приближение шторма благодаря улавливанию создаваемой им инфразвуковой волны

16 Гц) собственной частотой и большой амплитудой колебаний. К концу одной ветви камертона привинчена тонкая и узкая металлическая полоска, оканчивающаяся остриём. Остриё загнуто вниз и слегка касается лежащей на столе закопчённой стеклянной пластинки. При быстром перемещении пластинки под колеблющимися ветвями остриё оставляет на ней след в виде волнообразной линии.

Волнообразная линия, прочерченная на пластинке остриём, очень близка к синусоиде. Таким образом, можно считать, что каждая ветвь звучащего камертона совершает гармонические колебания.

Различные опыты свидетельствуют о том, что любой источник звука обязательно колеблется (хотя чаще всего эти колебания незаметны для глаза). Например, звуки голосов людей и многих животных возникают в результате колебаний их голосовых связок, звучание духовых музыкальных инструментов, звук сирены, свист ветра, шелест листьев, раскаты грома обусловлены колебаниями масс воздуха.

Но далеко не всякое колеблющееся тело является источником звука. Например, не издаёт звука колеблющийся грузик, подвешенный на нити или пружине. Перестанет звучать и металлическая линейка, изображённая на рисунке 93, если переместить её в тисках вверх и тем самым удлинить свободный конец настолько, чтобы частота его колебаний стала меньше 16 Гц.

Исследования показали, что человеческое ухо способно воспринимать как звук механические колебания с частотой в пределах от 16 до 20 000 Гц (передающиеся обычно через воздух). Поэтому колебания этого диапазона частот называют **звуковыми**.

Следует отметить, что указанные границы звукового диапазона условны, так как зависят от возраста людей и индивидуальных особенностей их слухового аппарата. Обычно с возра-

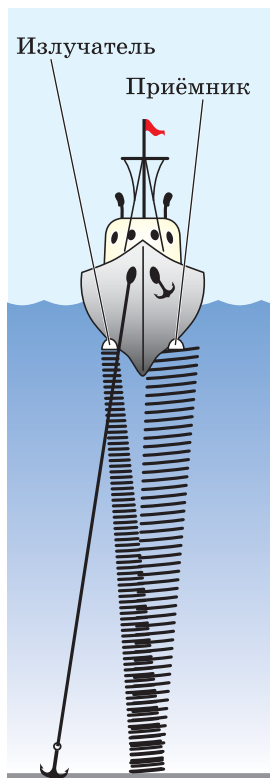


Рис. 97. Использование ультразвуковых колебаний для измерения глубины моря

стом верхняя частотная граница воспринимаемых звуков значительно понижается — некоторые пожилые люди могут слышать звуки с частотами, не превышающими 6000 Гц. Дети же, наоборот, могут воспринимать звуки, частота которых несколько больше 20 000 Гц.

Механические колебания, частота которых превышает 20 000 Гц, называют *ультразвуковыми*, а колебания с частотами менее 16 Гц — *инфразвуковыми*.

Ультразвук и инфразвук широко распространены в природе. Летучие мыши, дельфины и некоторые другие животные излучают и используют ультразвук для ориентации в пространстве и общения. При помощи инфразвука общаются между собой киты и слоны.

Ультразвук находит широкое применение в технике. Например, направленные узкие пучки ультразвука применяются для измерения глубины моря (рис. 97). Для этой цели на дне судна помещают излучатель и приёмник ультразвука. Излучатель даёт короткие сигналы, которые доходят до дна и, отражаясь от него, достигают приёмника. Моменты излучения и приёма сигнала регистрируются. Таким образом, за время t , которое проходит с момента отправления сигнала до момента его приёма, сигнал, распространяющийся со скоростью v , проходит путь, равный удвоенной глубине моря, т. е. $2h$:

$$2h = vt.$$

Отсюда легко вычислить глубину моря:

$$h = \frac{vt}{2}.$$

Описанный метод определения расстояния до объекта называют *эхолокацией*.



1. Расскажите о ходе опытов, изображённых на рисунках 93—96. Какой вывод из них следует?
2. Что является источниками звука?
3. Механические колебания каких частот называют звуковыми и почему?
4. Какие колебания называют ультразвуковыми; инфразвуковыми?
5. Расскажите об измерении глубины моря методом эхолокации.



1. Если по краю стакана, наполовину наполненного водой, провести смычком, то на воде появляются мелкие волны. Объясните явление.
2. Почему изданный звук с течением времени исчезает?



УПРАЖНЕНИЕ 32

1. Звук от взмахов крыльев летящего комара мы слышим, а летящей птицы — нет. Почему?
2. Удар грома был услышан через 8 с после вспышки молнии. Считая скорость звука в воздухе при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ равной 331 м/с , вычислите, на каком расстоянии от наблюдателя произошёл грозовой разряд.

Это любопытно...

Инфразвук

Звуки с частотой менее 16 Гц — инфразвуки — не воспринимаются человеческим ухом. Но это совсем не значит, что они не оказывают влияние на организм человека. Иллюстрацией действия инфразвука может служить случай, произошедший в начале XX в. в одном из лондонских театров.

В театре ставили пьесу, одна из сцен которой должна была переносить зрителей в далёкое прошлое. Режиссёр никак не мог придумать, как погрузить зрителей в атмосферу таинственности, заставить их почувствовать тревогу. Известный американский физик **Роберт Вуд** (1868—1955) предложил использовать для этой цели низкий рокочущий звук. Вуд сконструировал трубу, которую соединил с органом. Однако, рассчитывая размеры трубы, физик, возможно, ошибся — на репетиции при нажатии на клавиши вместо ожидаемого звука в полной тишине начали дребезжать хрустальные подвески канделябров, оконные стёкла. Бессознательный ужас испытали не только артисты, но и проходящие мимо театра люди. Причиной этого был инфразвук.

Впоследствии звуками, «рождающимися у порога тишины», заинтересовались многие исследователи. Было установлено, что на организм человека инфразвук воздействует из-за резонанса, поскольку частоты колебаний, характерные для многих процессов в организме, лежат в инфразвуковом диапазоне. Инфразвуки могут вызывать головную боль, приводить к повышенной утомляемости, снижать работоспособность. Инфразвук определённой частоты способен нарушить работу нашего мозга, вызвать обмороки и привести к временной слепоте.

Довольно часто инфразвук возникает вследствие природных причин: его источником могут быть грозы, бури, ураганы, а также некоторые типы землетрясений. Некоторые животные, например слоны, используют его для подачи сигналов сородичам, а также для отпугивания врагов.

Для инфразвука характерно малое поглощение, он может распространяться на большие расстояния. Так, медузы, слышащие инфразвуки с частотой 8—13 Гц, ощущают приближение шторма за сотни километров от берега и заблаговременно уходят на глубину. По принципу «инфрауха» медузы учёные-бионики создали электронный предсказатель бурь, который может предупредить о надвигающейся буре за 15 часов, а не за 2, как обычный морской барометр. Инфразвуковые колебания применяют для исследования океанов, атмосферы, в том числе для определения мест взрывов или извержения вулканов.

Нужно отметить, что и человек приложил руку к созданию «инфразвукового шума». Инфразвуковые волны могут сопровождать работу транспорта и промышленных установок, таких как станки, вентиляционные установки, компрессоры и т. д.

§ 35

ВЫСОТА, ТЕМБР И ГРОМКОСТЬ ЗВУКА

Обратимся ещё раз к опыту, изображённому на рисунке 93. Как уже говорилось, свободная часть линейки создаёт звук только в том случае, если она колеблется с частотой, не меньшей чем 16 Гц. Переместим линейку в тисках вниз (укоротив тем самым верхнюю часть) и приведём её в колебательное движение. Заметим, что частота колебаний линейки увеличилась, а издаваемый ею звук стал выше. Продолжая периодически укорачивать колеблющуюся часть линейки, убедимся в том, что с увеличением частоты колебаний звук повышается.

Проверим этот вывод на другом опыте. Возьмём зубчатый диск (рис. 98, а), с помощью специального устройства приведём его во вращение и прикоснёмся к зубчатому краю тонкой картонной пластинкой (рис. 98, б). Под воздействием зубьев вращающегося диска пластинка начнёт совершать вынужденные колебания, в результате чего мы услышим звук. Увеличим скорость вращения диска, и пластинка станет колебаться чаще, а издаваемый ею звук будет выше.

На основании описанного опыта можно заключить, что **высота звука зависит от частоты колебаний: чем больше частота колебаний источника звука, тем выше издаваемый им звук.**

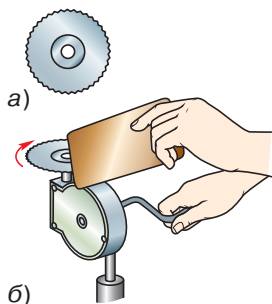
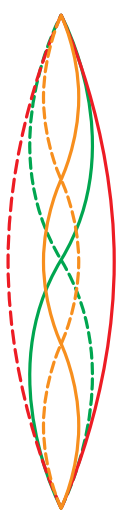


Рис. 98. Исследование зависимости высоты звука от частоты колебаний источника



Напомним, что ветви камертона совершают гармонические (синусоидальные) колебания, которые являются самым простым видом колебаний. Таким колебаниям присуща только одна строго определённая частота. Звук камертона является **чистым тоном**.

Чистым тоном называют звук источника, совершающего гармонические колебания определённой частоты.



Колебания струны, издающей звук основного тона и двух обертонов

Звуки от других источников (например, звуки различных музыкальных инструментов, голоса людей, звук сирены и многие другие) представляют собой совокупность гармонических колебаний разных частот, т. е. совокупность чистых тонов.

Самую низкую (т. е. самую малую) частоту такого сложного звука называют **основной частотой**, а соответствующий ей звук определённой высоты — **основным тоном** (иногда его называют просто **тоном**). *Высота сложного звука определяется именно высотой его основного тона.*

Все остальные тоны сложного звука называют **обертонами**. Частоты всех обертонов данного звука в целое число раз больше частоты его основного тона (поэтому их называют также **вышшими гармоническими тонами**).

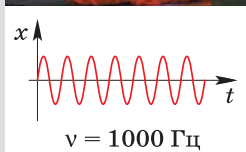
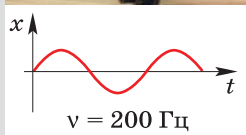
Обертоны определяют **тембр** звука, т. е. такое его качество, которое позволяет нам отличать звуки одних источников от звуков других. Например, мы легко отличаем звук рояля от звука скрипки даже в том случае, если эти звуки имеют одинаковую высоту, т. е. одну и ту же частоту основного тона. Отличие же этих звуков обусловлено разным набором обертонов (совокупность обертонов различных источников может отличаться количеством обертонов, их амплитудами, сдвигом фаз между ними, спектром частот).

Таким образом, **высота звука определяется частотой его основного тона: чем больше частота основного тона, тем выше звук.**



Тембры звуков рояля и скрипки отличаются набором обертонов

Тембр звука определяется совокупностью его обертонов.



При равных амплитудах женский голос, имеющий большую частоту, чем мужской, воспринимается как более громкий

Чтобы выяснить, от чего зависит громкость звука, вернёмся к опыту, изображённому на рисунке 95. К одной ветви камертона подводят вплотную маленький висящий на нити шарик, а по другой слегка ударяют молоточком. Обе ветви камертона приходят в колебательное движение. Слышен негромкий звук. Шарик отскакивает от колеблющейся ветви на небольшое расстояние. Затем камертон глушат и снова ударяют по нему, но гораздо сильнее, чем в первый раз. Теперь камертон звучит громче, а шарик отскакивает на большее расстояние, что свидетельствует о большей амплитуде колебаний ветвей.

Этот и многие другие опыты позволяют сделать вывод о том, что **громкость звука зависит от амплитуды колебаний: чем больше амплитуда колебаний, тем громче звук.**

В рассмотренном опыте частоты колебаний обоих звуков — тихого и громкого — одинаковы, так как их источником является один и тот же камертон. Но если сравнить звуки *разных частот*, то кроме амплитуды колебаний пришлось бы учитывать ещё один фактор, влияющий на громкость. Дело в том, что чувствительность человеческого уха к звукам разной частоты различна. *При одинаковых амплитудах как более громкие воспринимаются звуки, частоты которых лежат в пределах от 1000 до 5000 Гц.* Поэтому, например, высокий женский голос с частотой 1000 Гц будет для нашего уха громче низкого мужского с частотой 200 Гц, даже если амплитуды колебаний голосовых связок в обоих случаях одинаковы. *Громкость звука зависит также от его длительности и от индивидуальных особенностей слушателя.*

Громкость звука — это субъективное качество слухового ощущения, позволяющее располагать все звуки по шкале от тихих до громких.

Единицу громкости звука называют *сон*.



В практических задачах громкость звука принято характеризовать *уровнем звукового давления*, измеряемым в *белах (Б)* или *децибелах (дБ)*, составляющих десятую часть бела.

Например, звуку, возникающему при листании газеты, соответствует уровень звукового давления порядка 20 дБ, звуку звонка будильника — примерно 80 дБ, двигателя самолёта — порядка 130 дБ (такой громкий звук вызывает у человека болевое ощущение).



Систематическое воздействие на человека громких звуков, особенно шумов (совокупности звуков разной громкости, высоты тона, тембра), неблагоприятно отражается на его здоровье.

В шумных районах у многих людей появляются симптомы шумовой болезни: повышенная нервная возбудимость, быстрая утомляемость, повышенное артериальное давление. Поэтому в больших городах приходится принимать специальные меры для уменьшения шумов, например запрещать звуковые сигналы автомобилей.



1. С какой целью проводились опыты, изображённые на рисунках 93 и 98? Какой был сделан вывод по результатам этих опытов? **2.** Как на опыте удостовериться в том, что из двух камертонов более высокий звук издаёт тот, у которого больше собственная частота? (Частоты на камертонах не указаны.) **3***. От чего зависит высота звука? **4.** Как изменится громкость звука, если уменьшить амплитуду колебаний его источника? **5.** Звук какой частоты — 500 Гц или 3000 Гц — человеческое ухо воспримет как более громкий при одинаковых амплитудах колебаний источников этих звуков? **6.** От чего зависит громкость звука? **7.** Как отражается на здоровье человека систематическое действие громких звуков?



Известно, что чем туже натянута струна на гитаре, тем более высокий звук она издаёт. Как изменится высота звучания гитарных струн при значительном повышении температуры окружающего воздуха? Ответ поясните.



УПРАЖНЕНИЕ 33

- 1.** Какое насекомое чаще машет крыльями в полёте — шмель, комар или муха? Почему вы так думаете?

2. Зубья вращающейся циркулярной пилы создают в воздухе звуковую волну. Как изменится высота звука, издаваемого пилой при её холостом ходе, если на ней начать распиливать толстую доску из плотной древесины? Почему?
3. Звуковая волна распространяется в стали со скоростью 5000 м/с. Найдите частоту этой волны, если её длина равна 16,06 м.

Это любопытно...

Музыка и медицина

Лет двести назад имя французского композитора Марена Маре было достаточно хорошо известно. Правда, его сочинения носили односторонний характер. Особенной известностью пользовался созданный композитором цикл из двенадцати сонат, посвящённый странностям подагры. Вслед за тем он написал сонату для альта и клавесина, предназначенную исключительно для сопровождения операций. Но лечебный характер творений композитора никого не удивлял. В ту пору сочиняли музыку от мигрени и бессонницы, от спазмов и колик. Особенно модным лечебное музицирование было в великосветских салонах, в так называемой салонной медицине.

Врачи прописывали музыку своим вельможным пациентам не только от множества болезней, но и для избавления от дурных мыслей, для хорошего настроения, на все случаи жизни: какое произведение должно звучать при отходе ко сну, какое при пробуждении, что играть в гостиной, что за обеденным столом. В исполнителях подобных предписаний недостатка не было. При знатных особах состояли на службе музыканты, а то и целые оркестры. Впрочем, иногда считалось лечебным звучание какого-нибудь одного инструмента. Например, барабана. Его гулкие удары нередко сопровождали званые обеды. «Желудок любит ритм! — пояснял врач своё предписание. — Через некоторое время вы убедитесь в этом!»

§ 36

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Мы воспринимаем звуки, находясь на расстоянии от их источников. Обычно звук доходит до нас по воздуху. Воздух является упругой средой, передающей звук.

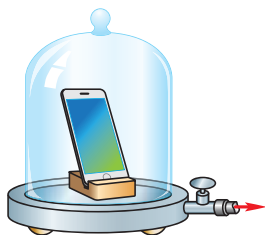


Рис. 99. Опыт, доказывающий, что в пространстве, где нет вещественной среды, звук не распространяется

Известно, что плотность воздуха мала. А что будет происходить, если около источника звука не будет воздуха вообще, т. е. он окажется в вакууме?

Проделаем следующий опыт. Источник звука — мобильный телефон — поместим под колокол воздушного насоса (рис. 99). Когда телефон зазвонит, мы услышим звук. Начнём откачивать воздух из-под колокола, звук будет становиться тише и тише, и в некоторый момент мы перестанем слышать звонок. Это произойдёт тогда, когда под колоколом не останется воздуха. Впустим под колокол воздух, снова услышим звук. Таким образом, *для распространения звука необходима среда.*

Хорошо проводят звуки упругие вещества, например металлы, древесина, жидкости, газы.

То, что жидкости хорошо проводят звуки, используется при оборудовании бассейнов для синхронного плавания специальными подводными динамиками, это позволяет спортсменам под водой слышать музыку.

Во времена, когда не было мобильных телефонов, дети забавлялись верёвочными телефонами: две коробочки, соединённые верёвочкой или проволокой. Если в одну коробочку говорить, как в микрофон, то в другую, приложенную к уху, как динамик, можно услышать всё, что вам тайно хотят поведать! Попробуйте через такое устройство поговорить со своим другом, находящимся в другой комнате. Как лучше передаётся звук, по верёвке или по проволоке?

Плохими проводниками звука являются пористые и мягкие материалы, такие как войлок, пробка, различные синтетические материалы (например, пенопласт), изготовленные на основе вспененных полимеров. Это учитывают при проектировании звукового оснащения театров, так как обивка кресел, занавес и другие материалы поглощают звук.

Итак, *звук распространяется в любой упругой среде — твёрдой, жидкой и газообразной, но не может распространяться в пространстве, где нет вещества.*

Колебания источника создают в окружающей его среде упругую волну звуковой частоты. Волна, достигая уха, воздействует на барабанную перепонку, заставляя её колебаться с частотой, равной частоте источника звука. Дрожания барабанной перепонки передаются посредством системы косточек окончанием слухового нерва, раздражают их и тем вызывают ощущение звука.

Напомним, что в газах и жидкостях могут существовать только продольные упругие волны, т. е. чередующиеся сгущения и разрежения среды, распространяющиеся от источника.

Скорость распространения звуковой волны не бесконечна, для распространения звука требуется некоторое время. Экспериментально определить скорость звука можно, наблюдая, например, за стрельбой из ружья. Человек, находящийся на расстоянии s от стрелка, сначала увидит огонь и дым. Они появляются в момент выстрела, тогда же происходит первое звуковое колебание. Позже, через некоторое время t , наблюдатель услышит звук выстрела. Зная расстояние до стрелка, можно определить скорость распространения звука в воздухе:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Скорость звука в воздухе при нормальных условиях равна 332 м/с.

Скорость звука в газах тем больше, чем выше их температура. Например, при температуре 20 °С скорость звука в воздухе равна 343 м/с, при 60 °С — 366 м/с, при 100 °С — 387 м/с. Объясняется это тем, что с повышением температуры возрастает упругость газов, а чем боль-



При стрельбе из ружья звук выстрела слышен позже, чем видно появление огня и дыма

ше упругие силы, возникающие в среде при её деформации, тем быстрее передаются колебания от одной точки к другой.

Скорость звука зависит также от свойств среды, в которой распространяется звук. Например, при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость звука в водороде равна 1284 м/с , а в углекислом газе — 259 м/с , так как молекулы водорода менее массивны и менее инертны.

В настоящее время скорость звука может быть измерена в любой среде. В таблице 2 приведены скорости звука в некоторых средах.

Таблица 2. Скорость звука в различных средах ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Среда	Скорость, м/с	Среда	Скорость, м/с
Вода	1483	Дерево (ель)	5000
Гранит	3850	Сталь	5000—6100
Медь	4700	Стекло	5500

Молекулы в жидкостях и твёрдых телах расположены ближе друг к другу и сильнее взаимодействуют, чем молекулы газов. Поэтому скорость звука в жидких и твёрдых средах больше, чем в газообразных.

Поскольку звук — это волна, то для определения скорости звука, помимо формулы $v = \frac{s}{t}$, можно пользоваться известными вам формулами: $v = \frac{\lambda}{T}$ и $v = v\lambda$. При решении задач скорость звука в воздухе обычно считают равной 340 м/с .



- 1.** С какой целью ставят опыт, изображённый на рисунке 99? Опишите, как этот опыт проводится и какой вывод из него следует. **2.** Может ли звук распространяться в газах, жидкостях, твёрдых телах?

Ответы подтвердите примерами. **3.** Какие тела лучше проводят звук — упругие или пористые? Приведите примеры упругих и пористых тел. **4.** Какую волну — продольную или поперечную — представляет собой звук, распространяющийся в воздухе; в воде? **5.** Приведите пример, показывающий, что звуковая волна распространяется не мгновенно, а с определённой скоростью.



УПРАЖНЕНИЕ 34

1. Может ли звук сильного взрыва на Луне быть слышен на Земле? Ответ обоснуйте.
2. Если к каждому из концов нити привязать по одной половинке мыльницы, то с помощью такого телефона можно переговариваться даже шёпотом, находясь в разных комнатах. Объясните явление.
3. Определите скорость звука в воде, если источник, колеблющийся с периодом 0,002 с, возбуждает в воде волны длиной 2,9 м.
4. Определите длину звуковой волны частотой 725 Гц в воздухе, в воде и в стекле.
5. По одному концу длинной металлической трубы один раз ударили молотком. Объясните, почему у другого конца трубы был слышен двойной удар.
6. Наблюдатель, стоящий около прямолинейного участка железной дороги, увидел пар над свистком идущего вдали паровоза. Через 2 с после появления пара он услышал звук свистка, а через 34 с паровоз прошёл мимо наблюдателя. Определите скорость движения паровоза.

Это любопытно...

Барабанный телеграф

Передача известий посредством звуковых сигналов распространена у некоторых племён Африки, Центральной Америки и Полинезии. Первобытные племена употребляют для этой цели особые барабаны, с помощью которых передают звуковые сигналы на огромное расстояние: условный сигнал, услышанный в одном месте, повторяется в другом, передаётся таким же образом далее, и в короткое время обширная область уведомляется о каком-либо важном событии. Во время первой войны Италии с Абиссинией все передвижения итальянских войск быстро становились известными негусу Менелику (негус — царь, титул императора Эфиопии). Обстоятельство это приводило в недоумение итальянский штаб, не подозревавший о существовании у противника барабанного «телеграфа». В начале второй войны Италии с Абиссинией подобным же

образом был «опубликован» изданный в Аддис-Абебе приказ о всеобщей мобилизации: через несколько часов он стал известен в самых отдалённых селениях страны. То же самое наблюдалось и во время англо-бурской войны: благодаря «телеграфу» кафров все военные известия с необыкновенной быстротой распространялись среди обитателей Каплэнда, на несколько суток опережая официальные донесения через курьеров.

По свидетельству путешественников, система звуковых сигналов разработана у некоторых африканских племён так хорошо, что их можно считать обладателями телеграфа более совершенного, чем оптический телеграф европейцев, предшествовавший электрическому.

(По книге: Я. И. Перельман. Занимательная физика. Книга 2.)

§ 37

ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА. ЗВУКОВОЙ РЕЗОНАНС

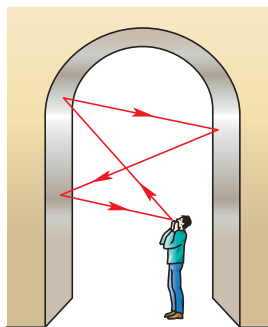


Рис. 100. Отражение звуковых волн

Каждый из вас знаком с таким звуковым явлением, как эхо. Эхо образуется в результате отражения звука от различных преград — стен большого пустого помещения, леса, сводов высокой арки в здании (рис. 100).

Но почему мы не слышим эха в небольшой квартире? Ведь и в ней звук должен отражаться от стен, потолка, пола.

Оказывается, эхо слышно лишь в том случае, когда отражённый звук воспринимается отдельно от произнесённого. Для этого нужно, чтобы промежуток времени между воздействием этих двух звуков на барабанную перепонку уха составлял не менее 0,06 с.

Определим, через какое время после произнесённого вами короткого возгласа отражённый от стены звук достигнет вашего уха, если вы стоите на расстоянии 3 м от этой стены.

Звук должен пройти расстояние до стены и обратно, т. е. 6 м, распространяясь со скоростью 340 м/с. На это потребуется время $t = \frac{s}{v}$:

$$t = \frac{6 \text{ м}}{340 \text{ м/с}} \approx 0,02 \text{ с}.$$

В данном случае интервал между двумя воспринимаемыми вами звуками — произнесён-



В пустом спортивном зале из-за наложения отражённых от разных поверхностей звуковых волн вместо чёткого звука слышен гул

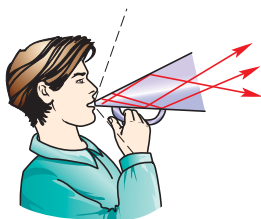


Рис. 101. Принцип действия рупора



Рис. 102. Пример механического резонанса

ным и отражённым — значительно меньше того, который необходим, чтобы услышать эхо. Кроме того, образованию эха в комнате препятствует находящаяся в ней мебель, шторы и другие предметы, частично поглощающие отражённый звук. Поэтому в таком помещении речь людей и другие звуки не искажаются эхом и звучат чётко и разборчиво.

Бывают ситуации, когда эхо мешает различать речь. В одной из церквей итальянского города Пизы звук живёт двенадцать секунд. А в зале библиотеки американского города Лос-Анджелес звук не угасает в течение двадцати секунд. Приглашать докладчика в такое помещение не имеет смысла: кроме гула, никто ничего не услышит. Это происходит из-за того, что гладкие стены, потолок и пол хорошо отражают звуковые волны. Они распространяются по помещению, накладываются друг на друга и образуют многократное эхо, воспринимаемое как гул.

На свойстве звука отражаться от гладких поверхностей основано действие рупора — расширяющейся трубы обычно круглого или прямоугольного сечения (рис. 101). При использовании рупора звуковые волны не рассеиваются в стороны, а образуют узконаправленный пучок, за счёт чего мощность звука увеличивается и он распространяется на большее расстояние.

Напомним, что амплитуда установившихся вынужденных механических колебаний достигает наибольшего значения в том случае, если частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебательной системы.

Например, довольно тяжёлый нитяной маятник (рис. 102) можно сильно раскачать, если периодически дуть на него (даже очень слабой струёй) в направлении его движения с частотой, равной его собственной частоте.

Резонанс можно наблюдать и в случае совпадения собственной частоты колебательной системы с частотой звуковой волны. Для

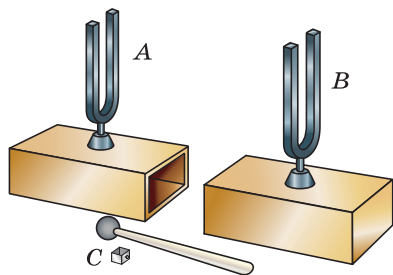


Рис. 103. Оборудование для демонстрации звукового резонанса

наблюдения такого явления воспользуемся двумя одинаковыми камертонами, укреплёнными на специальных ящиках, открытых с одной стороны (рис. 103) и повернутых друг к другу открытыми частями. Камертон *A* используется в качестве источника звука. Заставим его колебаться, ударив молотком по ножке камертона, затем остановим колебания камертона рукой. Звук всё равно будет слышен. Его стал издавать камертон *B* из-за того, что дошедшая до него звуковая волна вызывает колебания его ножек. Если использовать разные камертоны, явление наблюдаться не будет.

Изменим частоту колебаний одного камертона, оставив неизменной частоту другого. Для этого на ножку камертона *B* оденем небольшую муфточку *C*. Заставим звучать камертон *A*. Камертон *B* при этом не зазвучит.

Объяснить эти явления можно следующим образом. Если собственные частоты камертонов одинаковые, то колебания камертона *A* вызывают вынужденные колебания камертона *B* с максимальной амплитудой. Возникает резонанс. Если собственные частоты камертонов разные, то резонанс возникать не будет. Амплитуда колебаний ножек камертона *B* будет столь мала, что мы звука не услышим.

Ящики, на которых установлены камертоны, способствуют усилению звука и наиболее полной передаче энергии от одного камертона к другому. Усиление звука происходит за счёт колебаний самого ящика и особенно столба воздуха в нём. Размеры ящика подбирают таким образом, чтобы собственная частота воздушного столба в нём совпадала с частотой колебаний камертона. При этом столб воздуха колеблется в резонанс с камертоном, т. е. амплитуда его колебаний и соответственно громкость звука достигают наибольших значений.

Камертон, снабжённый таким ящиком (*резонатором*), издаёт более громкий, но менее длительный звук (по закону сохранения энергии).

В музыкальных инструментах роль резонаторов выполняют части их корпусов. Например, в гитаре, скрипке и других подобных им струнных инструментах резонаторами служат деки, которые усиливают издаваемые струнами звуки и придают звучанию инструмента характерную для него окраску — тембр. Тембр звука зависит не только от формы и размера резонатора, но и от того, из какого дерева он изготовлен, и даже от состава лака, покрывающего его. Тембр определяется также материалом струны и тем, гладкая она или витая.

Люди слышат голоса друг друга тоже благодаря резонаторам, которые есть в голосовом аппарате человека. Человек издаёт звуки из-за того, что голосовые связки колеблются под действием воздуха, выходящего из лёгких. Резонаторы человека — это полости, окружённые костными границами. Так, резонаторами являются полости глотки, рта и носа. Форму глотки и рта человек может менять с помощью артикуляционного аппарата — языка, губ и мягкого нёба. Это позволяет подстроить резонатор под необходимую частоту.



Дека гитары служит резонатором



1. Какова причина образования эха? Почему эхо не возникает в маленькой, заполненной мебелью комнате? Ответы обоснуйте. **2.** Как можно улучшить звуковые свойства большого зала? **3.** Почему при использовании рупора звук распространяется на большее расстояние? **4.** Приведите примеры проявления звукового резонанса, не упомянутые в тексте параграфа. **5.** Для чего камертоны устанавливают на резонаторных ящиках? Каково назначение резонаторов, применяемых в музыкальных инструментах? **6.** Что является источником голоса человека?



ЗАДАНИЕ



- Придумайте, с помощью каких предметов (кроме камертонов на резонаторных ящиках) можно продемонстрировать явление звукового резонанса. Проведите опыт, опишите наблюдаемые результаты.

ОБСУДИМ? Иван и Пётр прочитали научную статью в книге Л. В. Тарасова «Физика в природе». В книге автор проводил аналогию между явлением оптической рефракции — искривлением световых лучей в оптически неоднородной среде — и явлением акустической рефракции. Ребят заинтересовало, где в повседневной жизни они могут услышать подтверждение этого факта. Иван предположил, что именно из-за этого эффекта плохо слышно, когда человек кричит против ветра.

В подтверждение своих слов он из этой книги привёл следующие данные:

1. Скорость звука в воздухе при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 330 м/с .

2. При температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость звука 312 м/с .

3. При температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ эта скорость уже составляет 350 м/с .

Прав ли Иван? Действительно ли явление рефракции в воздухе влияет на слышимость в приведённом опыте? Напишите развёрнутые рассуждения, опираясь на приведённые научные данные.

Пётр не согласился с Иваном и привёл другие данные из этой же книги: скорость звука в воздухе при температуре $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 340 м/с , а скорость ветра обычно не превышает $10\text{—}15\text{ м/с}$.

Что мог предполагать Пётр для объяснения плохой слышимости при сильном ветре?

Приведите свои рассуждения по этому эффекту.

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Определение качественной зависимости периода колебаний пружинного маятника от массы груза и жёсткости пружины» (возможная форма: презентация, опыт).
2. «Ультразвук и инфразвук в природе, технике и медицине» (возможная форма: презентация, реферат, макет).

Из курса физики 8 класса вам известно о магнитном действии электрического тока. Магнитное поле можно обнаружить вокруг проводника с током. Возникает оно и в том случае, когда ток проходит через раствор или расплав электролита. Напомним, что в первом случае электрический ток создаётся свободными электронами, во втором — положительно и отрицательно заряженными ионами, движущимися навстречу друг другу. Можно сказать, что *магнитное поле создаётся движущимися заряженными частицами, как положительными, так и отрицательными.*

Магнитное поле создают и постоянные магниты. Согласно гипотезе Ампера, намагниченность веществ существует благодаря электрическим токам, которые циркулируют в атомах и молекулах вещества¹.

На рисунке 104 показано, что в постоянных магнитах эти элементарные кольцевые токи ориентированы одинаково. Поэтому магнитные поля, образующиеся вокруг каждого такого тока, усиливают друг друга, создавая поле внутри и вокруг магнита.

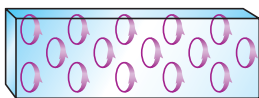


Рис. 104. Иллюстрация гипотезы Ампера

¹ После того как в начале XX в. была предложена планетарная модель атома, эти мельчайшие токи стали связывать с движением электронов по орбитам внутри атомов. Дальнейшее развитие физики показало, что движение электронов в атомах объясняет магнитные свойства веществ только частично.

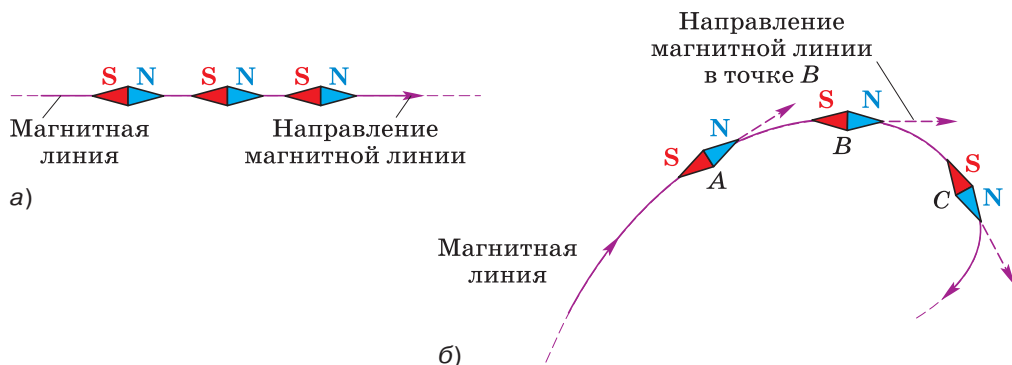


Рис. 105. В любой точке магнитной линии касательная к ней совпадает с осью магнитной стрелки, помещённой в эту точку

Для наглядного представления магнитного поля используются магнитные линии (их называют также линиями магнитного поля). Напомним, что *магнитные линии — это воображаемые линии, вдоль которых расположились бы маленькие магнитные стрелки, помещённые в магнитное поле.*

Магнитную линию можно провести через любую точку пространства, в котором существует магнитное поле.

На рисунке 105 показано, что магнитная линия (как прямолинейная, так и криволинейная) проводится так, чтобы в любой точке этой линии касательная к ней совпадала с осью магнитной стрелки, помещённой в эту точку.

Магнитные линии замкнуты и не пересекаются друг с другом. Например, картина магнитных линий прямого проводника с током представляет собой концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной проводнику.

Из рисунка 105 видно, что за направление магнитной линии в какой-либо её точке условно принимают направление, которое указывает северный полюс магнитной стрелки, помещённой в эту точку.

В тех областях пространства, где магнитное поле более сильное, магнитные линии изобра-



Рис. 106. Магнитные линии ближе друг к другу в тех местах, где магнитное поле сильнее

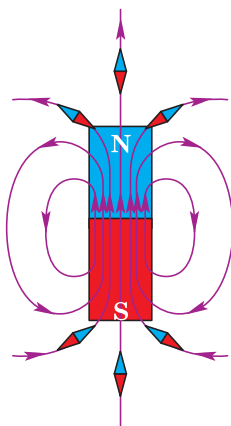
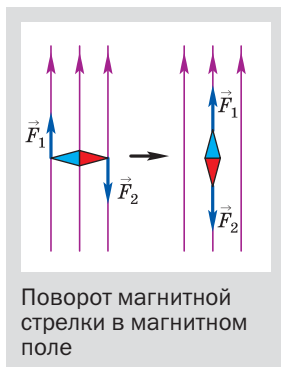


Рис. 107. Картина магнитного поля постоянного полосового магнита



жают ближе друг к другу, т. е. гуще, чем в тех местах, где поле слабее. Например, поле, изображённое на рисунке 106, слева сильнее, чем справа.

Таким образом, по картине магнитных линий можно судить не только о направлении, но и о величине магнитного поля (т. е. о том, в каких точках пространства поле действует на магнитную стрелку с большими поворачивающими силами, а в каких — с меньшими).

Рассмотрим картину линий магнитного поля постоянного полосового магнита (рис. 107). Магнитные линии выходят из северного полюса магнита и входят в южный. Внутри магнита они направлены от южного полюса к северному. Магнитные линии не имеют ни начала, ни конца: они либо замкнуты, либо, как средняя линия на рисунке, идут из бесконечности в бесконечность.

Вне магнита магнитные линии расположены наиболее густо у его полюсов. Значит, возле полюсов поле самое сильное, а по мере удаления от полюсов оно ослабевает. Устанавливаясь вдоль магнитных линий, магнитные стрелки поворачиваются под действием сил со стороны поля. Чем ближе к полюсу магнита расположена стрелка, тем с большими по модулю поворачивающими силами действует на неё поле магнита. Искривление магнитных линий свидетельствует о том, что направления поворачивающих сил тоже меняются от точки к точке.

Таким образом, силы, с которыми поле полосового магнита действует на помещённую в это поле магнитную стрелку, в разных точках поля могут быть различными.

Такое поле называют **неоднородным**. Линии неоднородного магнитного поля искривлены, их плотность меняется от точки к точке.

Ещё одним примером неоднородного магнитного поля может служить поле вокруг прямого

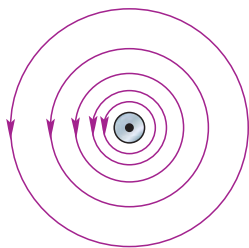


Рис. 108. Магнитные линии магнитного поля, созданного прямолинейным проводником с током

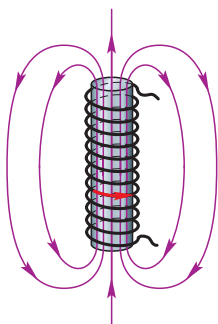


Рис. 109. Магнитное поле соленоида

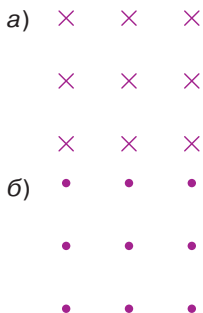


Рис. 110. Линии магнитного поля, направленные перпендикулярно плоскости чертежа: а — от наблюдателя; б — к наблюдателю

проводника с током. На рисунке 108 изображён участок такого проводника, расположенный перпендикулярно плоскости чертежа. Крестиком обозначено сечение проводника. Точка означает, что ток направлен из-за чертежа к нам, как будто мы видим остриё стрелы, указывающей направление тока (ток, направленный от нас за чертёж, обозначают крестиком, как будто мы видим хвостовое оперение стрелы, направленной по току).

Из этого рисунка видно, что магнитные линии поля, созданного прямым проводником с током, представляют собой концентрические окружности, расстояние между которыми увеличивается по мере удаления от проводника.

В некоторой ограниченной области пространства можно создать **однородное** магнитное поле, т. е. поле, во всех точках которого силы, действующие на магнитную стрелку со стороны поля, одинаковы.

На рисунке 109 показано магнитное поле соленоида — проволочной цилиндрической катушки с током. Поле внутри соленоида можно считать однородным, если длина соленоида значительно больше его диаметра (вне соленоида поле неоднородно, его магнитные линии расположены примерно так же, как у полосового магнита). Таким образом, *магнитные линии однородного магнитного поля параллельны друг другу и расположены с одинаковой плотностью*.

Однородным является также поле внутри постоянного полосового магнита в центральной его части (см. рис. 107).

Для изображения магнитного поля пользуются следующим приёмом. Если линии однородного магнитного поля расположены перпендикулярно к плоскости чертежа и направлены от нас за чертёж, то их изображают крестиками (рис. 110, а), а если из-за чертежа к нам — то точками (рис. 110, б).



1. Что является источником магнитного поля? **2.** Чем создаётся магнитное поле постоянного магнита? **3.** Что такое магнитные линии? Что принимают за направление магнитной линии в какой-либо её точке? **4.** Как располагаются магнитные стрелки в магнитном поле, линии которого прямолинейны; криволинейны? **5.** О чём можно судить по картине линий магнитного поля? **6.** Какое магнитное поле — однородное или неоднородное — образуется вокруг полосового магнита; вокруг прямого проводника с током; внутри соленоида, длина которого значительно больше его диаметра? **7.** Что можно сказать о силах, действующих на магнитную стрелку в разных точках неоднородного магнитного поля; однородного магнитного поля? **8.** Чем отличается расположение магнитных линий в неоднородном и однородном магнитных полях?



Нарисуйте силы, которые действуют на магнитную стрелку, помещённую в однородное магнитное поле. Как будет двигаться стрелка?



УПРАЖНЕНИЕ 35

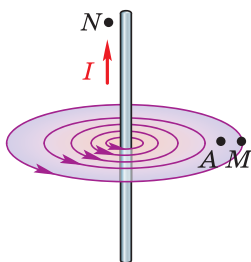


Рис. 111

- На рисунке 111 изображён участок проводника с током. Вокруг него в одной из плоскостей показаны линии магнитного поля, созданного этим током. Существует ли магнитное поле в точке A?
- В какой из точек — A, M или N (см. рис. 111) — поворачивающие силы, которые подействуют на магнитную стрелку со стороны поля, будут наибольшими по модулю; наименьшими?
- На рисунке 112 изображён проволочный виток с током и линии магнитного поля, создаваемого этим током.

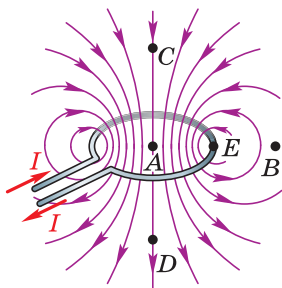


Рис. 112

а) Есть ли среди указанных на рисунке точек A, B, C и D такие, в которых поле подействует на северный полюс магнитной стрелки с одинаковой по модулю силой? ($AC = AD$, $AE = BE$.) Если такие точки есть, укажите их.

б) В какой из точек — A, B, C или D — поле подействует на магнитную стрелку с наибольшими по модулю поворачивающими силами?

в) Можно ли найти такие точки, в которых сила действия поля на северный полюс магнитной стрелки была бы одинакова как по модулю, так и по направлению? Если да, то сделайте в тетради рисунок и укажите на нём хотя бы две пары таких точек.

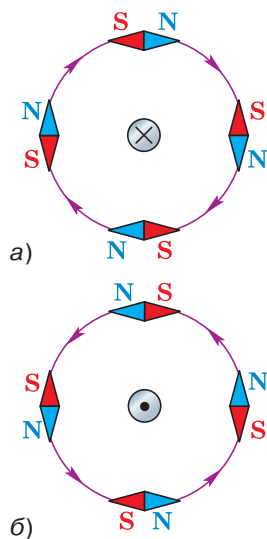


Рис. 113. Направление линий магнитного поля, созданного проводником с током, зависит от направления тока в проводнике

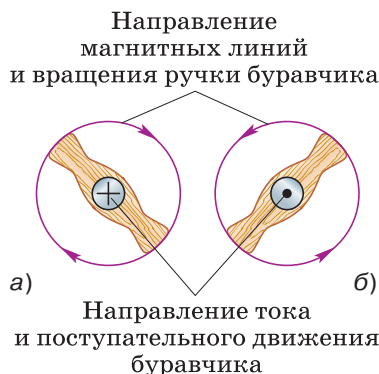


Рис. 114. Применение правила буравчика: проводник с током расположен перпендикулярно плоскости чертежа

Изучим магнитное поле, которое создаёт прямой ток. Для этого расположим вокруг него магнитные стрелки. На рисунке 113 показано расположение магнитных стрелок вокруг проводника с током, расположенного перпендикулярно плоскости чертежа. Из рисунка видно, что изменение направления тока приводит к повороту всех магнитных стрелок на 180° . Причём в обоих случаях оси стрелок располагаются по касательным к магнитным линиям.

Следовательно, направление линий магнитного поля тока зависит от направления тока в проводнике.

Эта связь может быть выражена **правилом буравчика** (или **правилом правого винта**), которое заключается в следующем: **если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линий магнитного поля тока** (рис. 114, 115).

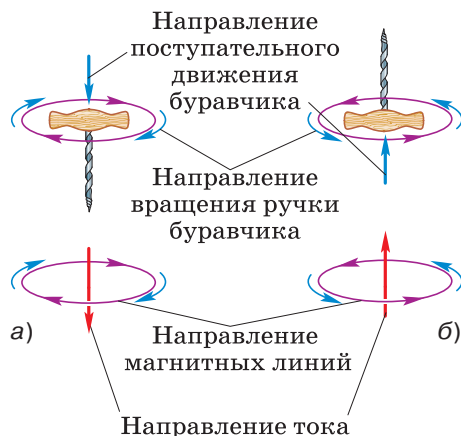


Рис. 115. Применение правила буравчика: проводник с током расположен в плоскости чертежа

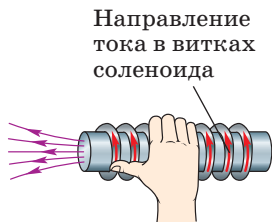


Рис. 116. Определение направления линий магнитного поля внутри соленоида

С помощью правила буравчика по направлению тока можно определить направление линий магнитного поля, создаваемого этим током, а по направлению линий магнитного поля — направление тока, создающего это поле.

Для определения направления линий магнитного поля соленоида удобнее пользоваться другим правилом, которое иногда называют **правилом правой руки**. Это правило формулируется так: если обхватить соленоид ладонью правой руки, направив четыре пальца по направлению тока в витках, то отставленный большой палец покажет направление линий магнитного поля внутри соленоида (рис. 116).

Вы уже знаете, что магнитное поле соленоида (см. рис. 109) подобно полю постоянного полосового магнита (см. рис. 107). Соленоид, как и магнит, имеет полюсы: тот конец соленоида, из которого магнитные линии выходят, является северным полюсом, а тот, в который входят, — южным.

Зная направление тока в соленоиде, по правилу правой руки можно определить направление магнитных линий поля внутри него, а значит, и его магнитные полюсы.

И наоборот, по направлению магнитных линий поля внутри соленоида или расположению его полюсов можно определить направление тока в витках соленоида.

Правило правой руки можно применять и для определения направления линий магнитного поля в центре витка с током.



- 1.** Опишите опыт, подтверждающий связь между направлением тока в проводнике и направлением линий магнитного поля, созданного проводником. **2.** Сформулируйте правило буравчика. **3.** Что можно определить, используя правило буравчика? **4.** Сформулируйте правило правой руки. **5.** Что можно определить с помощью правила правой руки?



Желая получить как можно большее магнитное поле, лаборант намотал одну на другую три одинаковые катушки и включил их в цепь постоянного тока. Добился ли он цели?



УПРАЖНЕНИЕ 36

1. На рисунке 117 изображён проволочный прямоугольник, направление тока в нём показано стрелками. Перечертите рисунок в тетрадь и, пользуясь правилом буравчика, начертите вокруг каждой из его четырёх сторон по одной магнитной линии, указав стрелкой её направление.

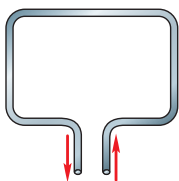


Рис. 117

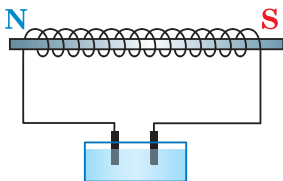


Рис. 118

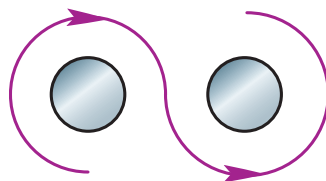


Рис. 119

2. Определите направление тока в катушке и полюсы источника тока (рис. 118), если при прохождении тока в катушке возникают указанные на рисунке магнитные полюсы.
3. Направление тока в витках обмотки подковообразного электромагнита показано стрелками (рис. 119). Определите полюсы электромагнита.

§ 40

ОБНАРУЖЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ЕГО ДЕЙСТВИЮ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ

Вы уже знаете, что на проводник с током, помещённый в магнитное поле, это поле действует с некоторой силой.

Действие магнитного поля на проводник с током может быть использовано для обнаружения магнитного поля в данной области пространства.

Конечно, обнаружить магнитное поле проще с помощью компаса. Но действие магнитного поля на находящуюся в нём магнитную стрелку

ку компаса, по существу, тоже сводится к действию поля на элементарные электрические токи, циркулирующие в молекулах и атомах магнитного вещества, из которого изготовлена стрелка.

Таким образом, **магнитное поле создаётся электрическим током и обнаруживается по его действию на электрический ток.**

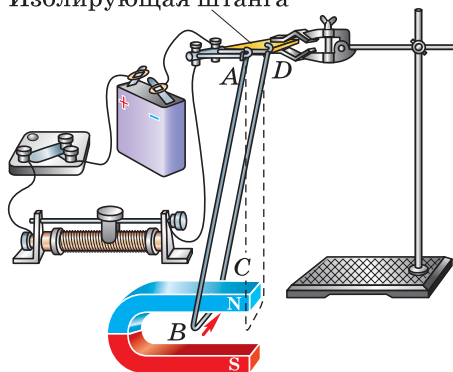
Определим, от чего зависит направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле. Для этого возьмём трёхстороннюю рамку $ABCD$, изготовленную из медной проволоки, и подвесим так, чтобы она могла свободно отклоняться от вертикали, а её сторона BC находилась между полюсами магнита.

При замыкании ключа в цепи возникает электрический ток, и рамка отклоняется от вертикали (рис. 120, а).

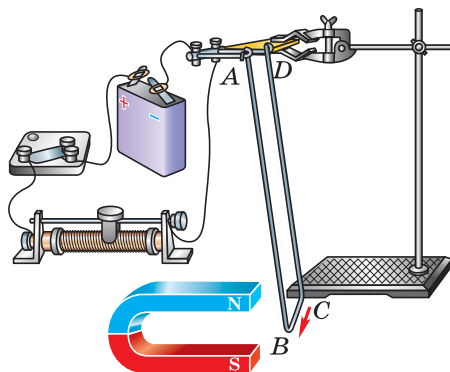
Изменим направление тока в цепи, поменяв местами провода в гнездах изолирующей штанги (рис. 120, б). При этом изменится и направление движения проводника BC , а значит, и направление действующей на него силы.

Направление силы изменится и в том случае, если, не меняя направления тока, поме-

Изолирующая штанга



а)



б)

Рис. 120. Действие магнитного поля на проводник с током

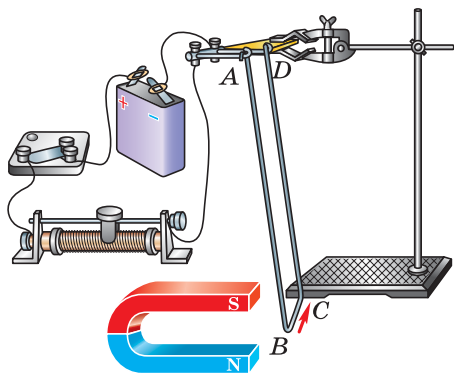


Рис. 121. Направление силы, действующей в магнитном поле на проводник с током, зависит от направления линий магнитного поля

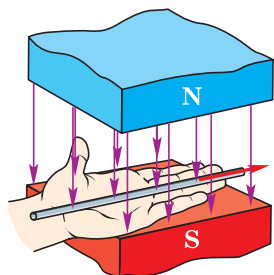


Рис. 122. Применение правила левой руки к проводнику с током

нять местами полюсы магнита (рис. 121), т. е. изменить направление линий магнитного поля.

Следовательно, *направление тока в проводнике, направление линий магнитного поля и направление силы, действующей на проводник, связаны между собой.*

Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно определить, пользуясь **правилом левой руки**.

В наиболее простом случае, когда проводник расположен в плоскости, перпендикулярной линиям магнитного поля, это правило заключается в следующем: **если левую руку расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь перпендикулярно к ней, а четыре пальца были направлены по току, то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей на проводник силы** (рис. 122).

Пользуясь правилом левой руки, следует помнить, что за направление тока в электрической цепи принимается направление от положительного полюса источника тока к отрицательному. Другими словами, четыре пальца левой руки должны быть направлены против движения электронов в электрической цепи. В таких проводящих средах, как растворы электролитов, где электрический ток создаётся движением зарядов обоих знаков, направление тока, а значит, и направление четырёх пальцев левой руки совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц.

С помощью правила левой руки можно определить направление силы, с которой магнитное поле действует на отдельно взятые движущиеся в нём частицы, как положительно, так и отрицательно заряженные.

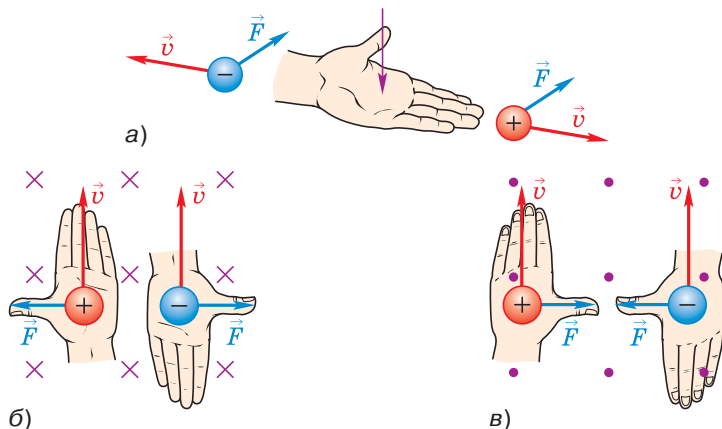


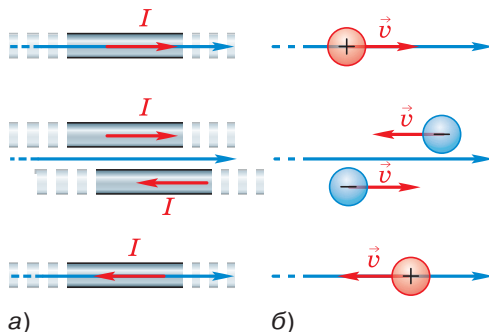
Рис. 123. Применение правила левой руки к заряженным частицам, движущимся в магнитном поле

Для наиболее простого случая, когда частица движется в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, это правило формулируется следующим образом: если левую руку расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь перпендикулярно к ней, а четыре пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (или против движения отрицательно заряженной), то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей на частицу силы (рис. 123).

По правилу левой руки можно также определить направление тока (если знаем, как направлены линии магнитного поля и действующая на проводник сила), направление магнитных линий (если известны направления тока и силы), знак заряда движущейся частицы (по направлению магнитных линий, силы и скорости движения частицы) и т. д.

Следует отметить, что сила действия магнитного поля на проводник с током или движущуюся заряженную частицу равна нулю, если направление тока в проводнике или скорость частицы совпадает с линией магнитного поля или параллельны ему (рис. 124).

Рис. 124. Магнитное поле не действует в случаях, если прямолинейный проводник с током или скорость движущейся заряженной частицы параллельны линиям магнитного поля или совпадают с ними



1. Какой опыт позволяет обнаружить наличие силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?
2. Как обнаруживается магнитное поле?
3. От чего зависит направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?
4. Сформулируйте правило левой руки для находящегося в магнитном поле проводника с током; для движущейся в этом поле заряженной частицы.
5. Что можно определить, пользуясь правилом левой руки?
6. В каком случае сила действия магнитного поля на проводник с током или движущуюся заряженную частицу равна нулю?



УПРАЖНЕНИЕ 37

1. В какую сторону покатится лёгкая алюминиевая трубочка при замыкании цепи (рис. 125)?

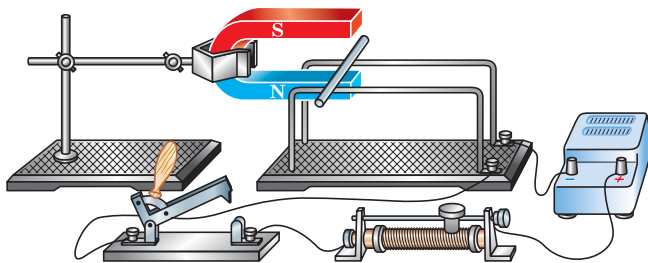


Рис. 125

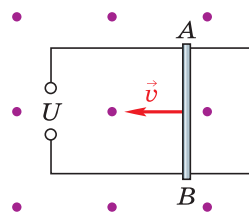


Рис. 126

2. На рисунке 126 изображены два оголённых проводника, соединённых с источником тока, и лёгкая алюминиевая трубочка AB .

Вся установка находится в магнитном поле. Определите направление тока в трубочке AB , если в результате взаимодействия этого тока с магнитным полем трубочка катится по проводникам в направлении, указанном на рисунке. Какой полюс источника тока является положительным, а какой — отрицательным?

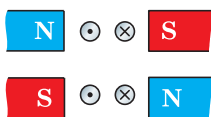


Рис. 127

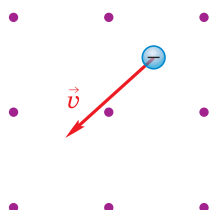


Рис. 128

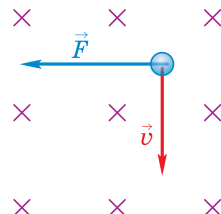


Рис. 129

3. Между полюсами магнитов (рис. 127) расположены четыре проводника с током. Определите направление силы, действующей на каждый из них.
4. Отрицательно заряженная частица движется со скоростью \vec{v} в магнитном поле (рис. 128). Укажите направление силы, с которой поле действует на частицу.
5. Магнитное поле действует с силой \vec{F} на частицу, движущуюся со скоростью \vec{v} (рис. 129). Определите знак заряда частицы.

§ 41

ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

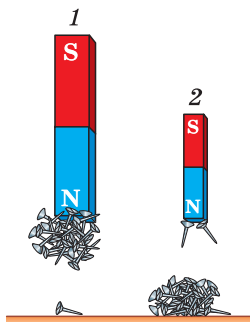


Рис. 130. Магнитное поле первого магнита сильнее, чем второго

Многие из вас наверняка замечали, что одни магниты создают в пространстве более сильные поля, чем другие. Например, поле первого магнита, изображённого на рисунке 130, сильнее, чем второго. Действительно, при одном и том же расстоянии до гвоздей, рассыпанных на столе, сила притяжения к первому магниту оказалась достаточной для преодоления силы тяжести гвоздей, а сила притяжения ко второму — нет.

Какой же величиной можно охарактеризовать магнитное поле?

Магнитное поле характеризуют векторной физической величиной, которую обозначают символом \vec{B} и называют **индукцией магнитного поля** (или магнитной индукцией).

Поясним, что это за величина.

Напомним, что магнитное поле может действовать с определённой силой на помещённый в него проводник с током.

Поместим прямолинейный участок проводника AB с током в магнитное поле перпенди-

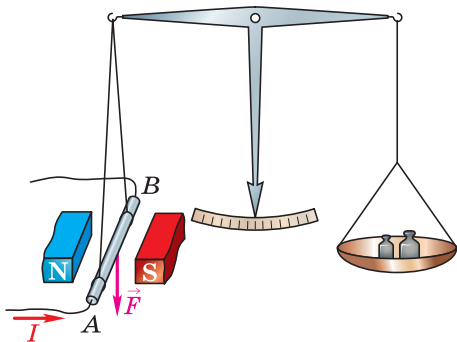


Рис. 131. Опыт по измерению силы, действующей на помещённый в магнитное поле проводник с током

кулярно его магнитным линиям (рис. 131). При показанном на рисунке направлении тока в проводнике и расположении полюсов магнита действующая на проводник сила, согласно правилу левой руки, будет направлена вниз. Определить эту силу можно, вычислив вес гирьки, которую приходится добавлять на правую чашу весов для их уравнивания.

Опыты показывают, что модуль этой силы зависит от самого магнитного поля — более мощный магнит действует на данный проводник с большей силой. Кроме того, сила действия магнитного поля на проводник пропорциональна длине l этого проводника и силе тока I в нём.

Отношение же модуля силы F к длине проводника l и силе тока I (т. е. $\frac{F}{Il}$) не зависит ни от длины проводника, ни от силы тока в нём.

Отношение $\frac{F}{Il}$ зависит только от поля и может служить его количественной характеристикой.

Эта величина и принимается за модуль вектора магнитной индукции.

$$B = \frac{F}{Il}$$

$$B = \frac{F}{Il}.$$

Модуль вектора магнитной индукции B равен отношению модуля силы F , с которой магнитное поле действует на расположенный перпендикулярно магнитным линиям проводник с током, к силе тока I в проводнике и его длине l .

Если магнитное поле одинаково во всех точках пространства, то такое поле называют *однородным*. Магнитное поле может быть и неоднородным.

По приведённой выше формуле можно определить индукцию однородного магнитного поля.

В СИ единица магнитной индукции названа **тесла (Тл)** в честь электротехника сербского происхождения **Никола Тесла** (1856—1943).

Установим взаимосвязь между единицей магнитной индукции и единицами других величин СИ:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

До сих пор для графического изображения магнитных полей мы пользовались линиями, которые условно называли магнитными линиями или линиями магнитного поля. Так как теперь вы знаете, что характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции, то можно ввести более точное название магнитных линий — **линии магнитной индукции** (или **линии индукции магнитного поля**).

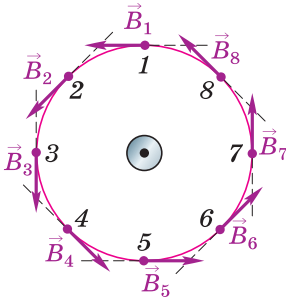


Рис. 132. Вектор магнитной индукции прямого проводника с током направлен по касательной к линии магнитной индукции в каждой точке поля

Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора магнитной индукции.

Данное определение линий магнитной индукции можно пояснить с помощью рисунка 132. На нём изображён проводник с током, расположенный перпендикулярно плоскости чертежа. Окружность вокруг проводника представляет собой одну из линий индукции магнитного поля, созданного протекающим по проводнику током. Проведённые к этой окружности касательные в любой точке совпадают по направлению с вектором магнитной индукции.

Теперь, пользуясь термином «магнитная индукция», назовём основные признаки однородного и неоднородного магнитных полей.

В однородном магнитном поле (рис. 133) вектор магнитной индукции \vec{B} во всех произвольно выбранных точках поля одинаков как по модулю, так и по направлению.

Сравним это поле с двумя неоднородными магнитными полями: полем постоянного поло-

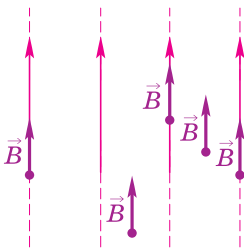
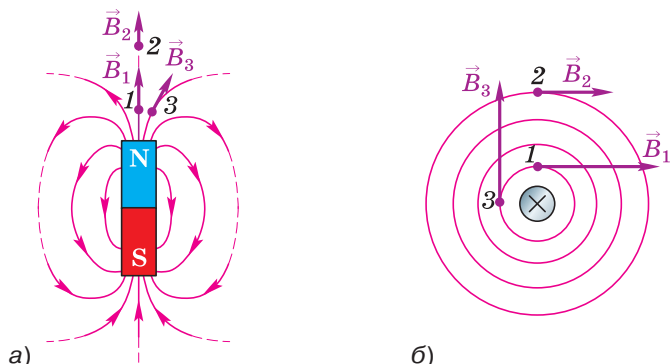


Рис. 133. Во всех точках однородного магнитного поля вектор магнитной индукции \vec{B} одинаков по модулю и по направлению

Рис. 134. В разных точках неоднородного магнитного поля вектор магнитной индукции может быть различным как по модулю, так и по направлению



сового магнита (рис. 134, а) и полем тока, протекающего по прямолинейному участку проводника (рис. 134, б).

Легко заметить, что в неоднородных полях, в отличие от однородного, вектор магнитной индукции меняется от точки к точке. Например, в каждом из рассматриваемых неоднородных полей при переходе из точки 1 в точку 2 вектор магнитной индукции меняется по модулю, при переходе из точки 1 в точку 3 — по направлению, при переходе из точки 2 в точку 3 вектор магнитной индукции меняется как по модулю, так и по направлению.

Магнитное поле называют **однородным**, если во всех его точках магнитная индукция \vec{B} одинакова. В противном случае поле называют **неоднородным**.

Чем больше магнитная индукция в данной точке поля, тем с большей силой будет действовать поле в этой точке на магнитную стрелку или движущийся электрический заряд.



1. Как называют векторную величину, которая является силовой характеристикой магнитного поля?
2. По какой формуле определяется модуль вектора магнитной индукции однородного магнитного поля?
3. Что называют линиями магнитной индукции?
4. В каком случае магнитное поле называют однородным, а в каком — неоднородным?
5. Как зависит сила, действующая в данной точке магнитного поля на магнитную стрелку или движущийся заряд, от магнитной индукции в этой точке?



УПРАЖНЕНИЕ 38

1. В однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции поместили прямолинейный проводник, по которому протекает ток. Сила тока в проводнике 4 А. Определите индукцию этого поля, если оно действует с силой 0,2 Н на каждые 10 см длины проводника.
2. Проводник с током поместили в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции B . Через некоторое время силу тока в проводнике уменьшили в 2 раза. Изменилась ли при этом индукция B магнитного поля, в которое был помещён проводник? Сопровождалось ли уменьшение силы тока изменением какой-либо другой физической величины? Если да, то что это за величина и как она изменилась?

§ 42

МАГНИТНЫЙ ПОТОК

На рисунке 135, *a* изображён проволочный контур, помещённый в однородное магнитное поле. Говорят, что контур в магнитном поле пронизывается определённым **магнитным потоком Φ** , или **потоком вектора магнитной индукции**.

Строгое определение магнитного потока выходит за рамки нашего курса, однако наглядно магнитный поток можно представить себе как величину, пропорциональную числу линий магнитной индукции, пронизывающих площадь, ограниченную контуром.

Допустим, что индукция магнитного поля, пронизывающего ограниченную контуром пло-

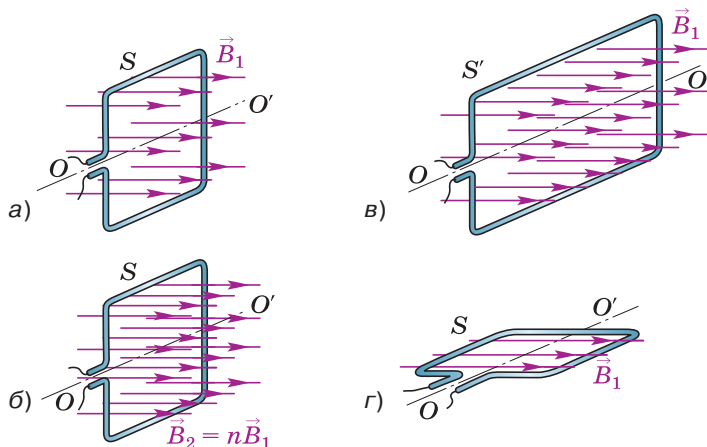


Рис. 135. Зависимость магнитного потока, пронизывающего площадь контура, от модуля вектора магнитной индукции, площади контура и от ориентации плоскости контура по отношению к линиям магнитной индукции

щадь, стала больше. Это могло произойти, например, в результате увеличения силы тока, создающего это магнитное поле, или при перемещении контура в другое, более сильное поле.

Поскольку линии магнитной индукции проводят так, чтобы густота линий была пропорциональна модулю вектора \vec{B} в данном месте, при увеличении магнитной индукции в n раз (от значения B_1 до значения $B_2 = nB_1$, как показано на рис. 135, а, б) во столько же раз возрастёт и число магнитных линий, пронизывающих площадь S данного контура, а значит, и магнитный поток.

При том же самом магнитном поле с индукцией B_1 магнитный поток, пронизывающий большую площадь S' (рис. 135, в), будет во столько же раз больше потока через площадь S (см. рис. 135, а), во сколько раз S' больше, чем S .

Если плоскость контура перпендикулярна линиям магнитной индукции (см. рис. 135, а), то при данной индукции B_1 поток Φ , пронизывающий ограниченную этим контуром площадь S , максимален.

Начнём поворачивать контур вокруг оси OO' . Проходящий сквозь него магнитный поток будет уменьшаться и станет равен нулю, когда плоскость контура расположится параллельно линиям магнитной индукции (рис. 135, г). Действительно, в этом случае линии магнитной индукции как бы скользят по плоскости рамки, не пронизывая её.

Таким образом, магнитный поток, пронизывающий площадь контура, меняется при изменении модуля вектора магнитной индукции \vec{B} , площади контура S и при вращении контура, т. е. при изменении его ориентации по отношению к линиям индукции магнитного поля.

Если же контур вращается так, что при любом его положении линии магнитной индукции лежат в плоскости контура, не пересекая ограниченную им площадь (рис. 136), то поток не меняется: в любой момент времени он равен нулю.

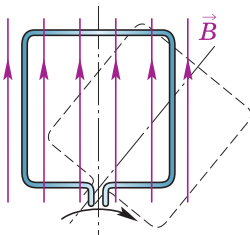


Рис. 136. Магнитный поток равен нулю, если линии магнитной индукции лежат в плоскости контура



1. От чего зависит магнитный поток, пронизывающий площадь плоского контура, помещённого в однородное магнитное поле? 2. Как меняется магнитный поток при увеличении в n раз магнитной индукции, если ни площадь, ни ориентация контура не меняются? 3. При какой ориентации контура по отношению к линиям магнитной индукции магнитный поток, пронизывающий площадь этого контура, максимален; равен нулю? 4. Меняется ли магнитный поток при таком вращении контура, когда линии магнитной индукции то пронизывают его, то скользят по его плоскости?



УПРАЖНЕНИЕ 39

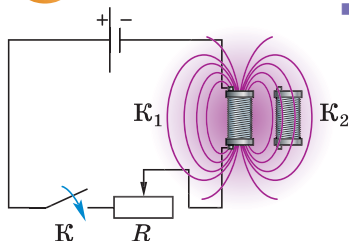


Рис. 137

- Проволочная катушка K_1 со стальным сердечником включена в цепь источника постоянного тока последовательно с реостатом R и ключом K (рис. 137). Электрический ток, протекающий по виткам катушки K_1 , создаёт в пространстве вокруг неё магнитное поле. В поле катушки K_1 находится такая же катушка K_2 . Каким образом можно менять магнитный поток, пронизывающий катушку K_2 ? Рассмотрите все возможные варианты.

§ 43

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



МАЙКЛ ФАРАДЕЙ

(1791—1867)

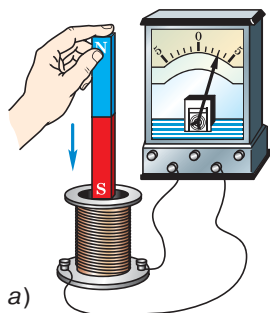
Английский физик. Исследовал электрические и магнитные явления. Открыл явление электромагнитной индукции

Вы уже знаете, что вокруг электрического тока всегда существует магнитное поле. Электрический ток и магнитное поле неотделимы друг от друга.

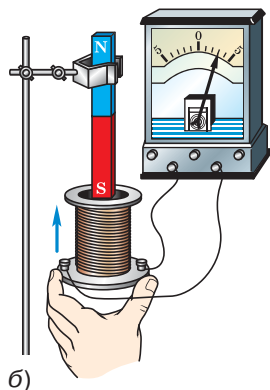
Но если электрический ток, как говорят, «создаёт» магнитное поле, то не существует ли обратного явления? Нельзя ли с помощью магнитного поля «создать» электрический ток?

Такую задачу в начале XIX в. пытались решить многие учёные. Поставил её перед собой и английский учёный **Майкл Фарадей**. «Превратить магнетизм в электричество» — так записал в своём дневнике эту задачу Фарадей в 1822 г. Почти 10 лет упорной работы потребовалось учёному для её решения.

Чтобы понять, как Фарадею удалось «превратить магнетизм в электричество», повторим некоторые опыты Фарадея, используя современные приборы.



а)



б)

Рис. 138. Возникновение индукционного тока при движении магнита и катушки относительно друг друга

На рисунке 138 показан опыт, в котором используют полосовой магнит, создающий магнитное поле, катушку с проводником и соединённый с ней гальванометр. Он позволит регистрировать электрический ток в случае его возникновения. Кроме того, гальванометр может определять изменение направления тока, так как стрелка прибора отклоняется в две стороны.

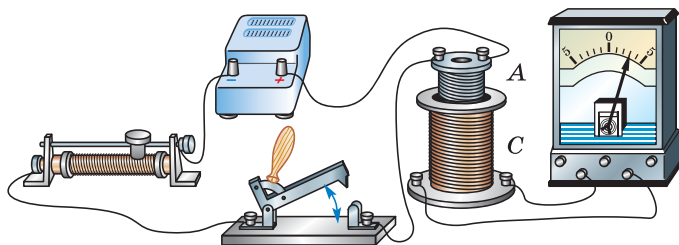
Если магнит вдвигать в катушку (рис. 138, а), то в ней возникает электрический ток. Его называют *индукционным*. Если магнит извлекать из катушки, то гальванометр снова покажет наличие индукционного тока. Только стрелка прибора будет отклоняться в противоположную сторону. Значит, ток изменил своё направление на противоположное. Если магнит не двигается, то тока в проводнике нет. Следовательно, ток в цепи катушки существует только во время движения магнита относительно катушки.

Индукционный ток в проводнике представляет собой такое же упорядоченное движение электронов, как и ток, полученный от гальванического элемента или аккумулятора. Название «индукционный» указывает только на причину его возникновения.

Для появления индукционного тока важно, чтобы было движение магнита и катушки друг относительно друга. В этом можно убедиться, если надевать катушку на неподвижный магнит (рис. 138, б) или снимать с него.

Поскольку магнитное поле существует не только вокруг постоянных магнитов, но и вокруг проводников с током, можно заменить постоянный магнит электромагнитом (катушкой с током). Используем это в следующем опыте (рис. 139). В нём магнитное поле создаётся катушкой А, по которой течёт ток, создаваемый источником тока. Она вставлена в катушку С, подключённую к гальванометру. В катушке С электрический ток возникает в нескольких случаях: при замыкании и размыкании ключа в цепи катушки А, при изменении силы тока в ней или при движении катушек друг относительно друга.

Рис. 139. Возникновение индукционного тока при замыкании и размыкании электрической цепи



Итак, появление индукционного тока связано с изменением магнитного поля, пронизывающего проводник.

Подтвердить этот вывод можно ещё на одном опыте. Между полюсами дугообразного магнита поместим плоский контур из проводника, концы которого соединены с гальванометром (рис. 140, а). Если вращать контур в таком магнитном поле, то пронизывающее его магнитное поле меняется и в контуре появляется индукционный ток. Он регистрируется гальванометром. Если контур оставлять неподвижным, а внутри него вращать магнит (рис. 140, б), то индукционный ток в контуре тоже появится.

Во всех рассмотренных опытах индукционный ток возникал при изменении магнитного потока, пронизывающего охваченную проводником площадь.

В случаях, изображённых на рисунках 138 и 139, магнитный поток менялся за счёт изменения индукции магнитного поля. Действительно, при движении магнита и катушки относительно друг друга (см. рис. 138) катушка попадала в области поля с большей или меньшей магнитной индукцией (так как поле магнита неоднородное). При замыкании и размыкании цепи катушки А (см. рис. 139) индукция создаваемого этой катушкой магнитного поля менялась за счёт изменения силы тока в ней.

При вращении проводочного контура в магнитном поле (см. рис. 140, а) или магнита относительно контура (см. рис. 140, б) магнитный поток менялся за счёт изменения ориентации этого контура по отношению к линиям магнитной индукции.

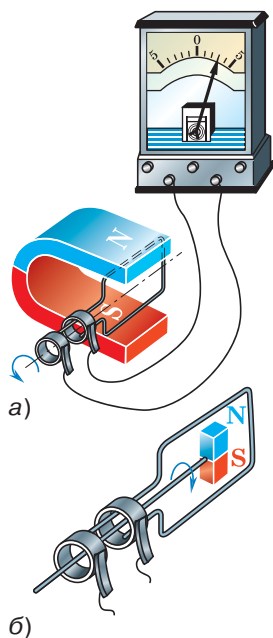


Рис. 140. При вращении контура в магнитном поле (магнита относительно контура) изменение магнитного потока приводит к возникновению индукционного тока

Таким образом,

при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную замкнутым проводником, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

В этом и заключается явление **электромагнитной индукции**.

Открытие электромагнитной индукции принадлежит к числу самых замечательных научных достижений первой половины XIX в. Оно вызвало появление и бурное развитие электротехники и радиотехники.

На основании явления электромагнитной индукции были созданы мощные генераторы электрической энергии, в разработке которых принимали участие учёные и техники разных стран. Среди них были и наши соотечественники: **Эмилий Христианович Ленц** (1804—1865), **Борис Семёнович Якоби** (1801—1874), **Михаил Осипович Доливо-Добровольский** (1862—1919) и другие, внёсшие большой вклад в развитие электротехники.



1. С какой целью ставились опыты, изображённые на рисунках 138—140? Как они проводились?
2. При каком условии в опытах (см. рис. 138, 139) в катушке, замкнутой на гальванометр, возникал индукционный ток?
3. В чём заключается явление электромагнитной индукции?
4. В чём важность открытия явления электромагнитной индукции?



УПРАЖНЕНИЕ 40

1. Как создать кратковременный индукционный ток в катушке K_2 , изображённой на рисунке 137?

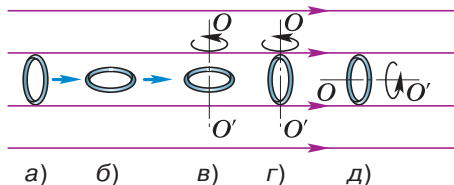


Рис. 141

2. Проволочное кольцо помещено в однородное магнитное поле (рис. 141). Стрелочки, изображённые рядом с кольцом, показывают, что в случаях *а* и *б* кольцо движется прямолинейно вдоль линий индукции магнитного поля, а в случаях *в*, *г* и *д* — вращается вокруг оси OO' . В каких из этих случаев в кольце может возникнуть индукционный ток?

Открытия Майкла Фарадея

Майкл Фарадей занимался исследованием связи между электрическими и магнитными явлениями. Его исследования увенчались открытием в 1831 г. явления электромагнитной индукции. В 1832 г. Фарадей высказал мысль о том, что распространение электромагнитных взаимодействий есть волновой процесс, происходящий с конечной скоростью. Стремление выявить природу электрического тока привело Фарадея к экспериментам по прохождению тока через растворы кислот, солей и щелочей. Результатом этих исследований стало открытие в 1833 г. законов электролиза (законы Фарадея). Фарадей ввёл в науку ряд понятий — «катод», «анод», «ион», «электролиз», «электрод»; в 1833 г. он изобрёл вольтметр. В 1840 г. ещё до открытия закона сохранения энергии Фарадей высказал мысль о единстве «сил» природы (различных видов энергии) и их взаимном превращении. В 1845 г. он впервые употребил термин «магнитное поле».

Открытия Фарадея завоевали широчайшее признание во всём научном мире; его именем впоследствии были названы законы, явления, единицы физических величин и т. д. Русский физик А. Г. Столетов так охарактеризовал значение Фарадея в развитии науки: «Никогда со времён Галилея свет не видал стольких поразительных и разнообразных открытий, вышедших из одной головы». В честь Майкла Фарадея Британское химическое общество учредило медаль Фарадея — одну из почётнейших научных наград.

§ 44

НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

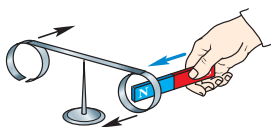


Рис. 142. При приближении к сплошному кольцу любого полюса магнита кольцо отталкивается от него

В предыдущем параграфе были рассмотрены опыты по получению индукционного тока и установлена причина его возникновения.

Как же направлен индукционный ток? Для ответа на этот вопрос воспользуемся прибором, изображённым на рисунке 142. Он представляет собой узкую алюминиевую пластинку с алюминиевыми кольцами на концах. Одно кольцо сплошное, другое имеет разрез. Пластинка с кольцами помещена на стойку и может свободно вращаться вокруг вертикальной оси.

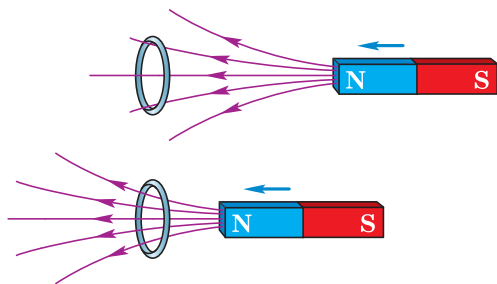


Рис. 143. Возрастание магнитного потока через кольцо при приближении к кольцу магнита

Возьмём полосовой магнит и внесём его в кольцо с разрезом — кольцо останется на месте. Если же вносить магнит в сплошное кольцо, то оно будет отталкиваться, уходить от магнита, поворачивая при этом всю пластинку. Результат будет точно таким же, если магнит будет повернут к кольцам не северным полюсом (как показано на рисунке), а южным. Объясним наблюдаемые явления.

При приближении к кольцу любого полюса магнита, поле которого является неоднородным, проходящий сквозь кольцо магнитный поток увеличивается (рис. 143). При этом в сплошном кольце возникает индукционный ток, а в кольце с разрезом тока не будет.

Ток в сплошном кольце создаёт в пространстве магнитное поле, благодаря чему *кольцо приобретает свойства магнита*. Взаимодействуя с приближающимся полосовым магнитом, кольцо отталкивается от него. Из этого следует, что кольцо и магнит обращены друг к другу одноимёнными полюсами, а векторы магнитной индукции (\vec{B}_K и \vec{B}_M) их полей направлены в противоположные стороны (рис. 144). Зная направление вектора индукции магнитного поля кольца, можно по правилу правой руки (см. рис. 116) определить направление индукционного тока в кольце. Отодвигаясь от приближающегося к нему магнита, кольцо противодействует увеличению проходящего сквозь него внешнего магнитного потока.

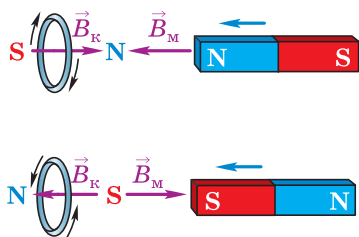


Рис. 144. Определение направления индукционного тока в кольце

Теперь посмотрим, что произойдёт при уменьшении внешнего магнитного потока сквозь кольцо. Для этого, удерживая кольцо рукой, внесём в него магнит. Затем, отпустив кольцо, начнём удалять магнит. В этом случае кольцо будет сле-

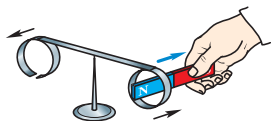


Рис. 145. При удалении магнита от сплошного кольца оно, притягиваясь, следует за магнитом

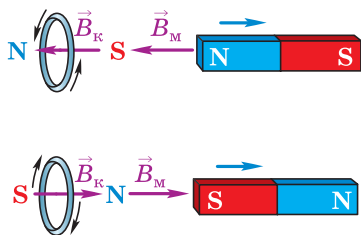


Рис. 146. Направление индукционного тока в кольце меняется при изменении направления движения магнита относительно кольца

довать за магнитом, притягиваться к нему (рис. 145). Значит, кольцо и магнит обращены друг к другу разноимёнными полюсами, а векторы магнитной индукции их полей направлены в одну сторону (рис. 146). При *одинаковом* направлении \vec{B}_K и \vec{B}_M магнитное поле тока будет *противодействовать* уменьшению внешнего магнитного потока, проходящего сквозь кольцо.

Мы видим, что для определения направления индукционного тока прежде всего необходимо узнать, как направлен вектор магнитной индукции созданного этим током магнитного поля (в центре кольца). На основании результатов рассмотренных опытов (в одном из них внешний магнитный поток увеличивался, а в другом — уменьшался) было сформулировано правило, которое в современной формулировке звучит так:

возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует изменению внешнего магнитного потока, которое вызвало этот ток.

Данное правило было установлено в 1834 г. российским учёным Э. Х. Ленцем, в связи с чем его называют **правилом Ленца**.



1. Для чего проводился опыт, изображённый на рисунках 142 и 145?
2. Почему кольцо с разрезом не реагирует на приближение магнита?
3. Объясните явления, происходящие при приближении магнита к сплошному кольцу (см. рис. 144); при удалении магнита (см. рис. 146).
4. Как определить направление индукционного тока в кольце?
5. Сформулируйте правило Ленца.



УПРАЖНЕНИЕ 41

1. Как вы думаете, почему прибор, изображённый на рисунке 142, изготовлен из алюминия? Как проходил бы опыт, если бы прибор был железным; медным?

2. В данном ниже перечне логических операций, которые мы выполняли для определения направления индукционного тока, *нарушена последовательность их проведения*. Запишите в тетради буквы, обозначающие эти операции, расположив их в правильной последовательности.

а) Определили направление индукционного тока в кольце (пользуясь правилом правой руки).

б) Определили направление вектора индукции \vec{B}_k магнитного поля тока в кольце по отношению к направлению вектора магнитной индукции \vec{B}_m поля магнита, исходя из того, что кольцо отталкивается от магнита при его приближении (значит, они обращены друг к другу одноимёнными полюсами, и $\vec{B}_k \uparrow \vec{B}_m$) и притягивается при удалении (значит, кольцо и магнит обращены друг к другу разноимёнными полюсами, и $\vec{B}_k \uparrow \vec{B}_m$).

в) Определили направление вектора магнитной индукции \vec{B}_m поля магнита (по расположению его полюсов).

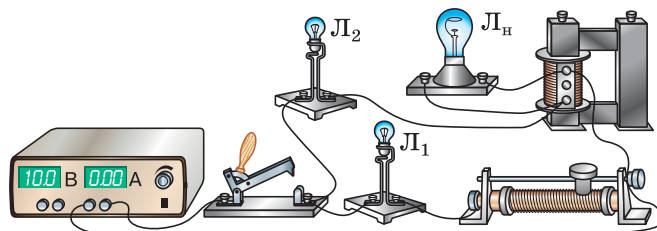
§ 45

ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

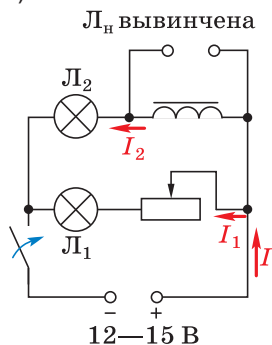
Рассмотрим частный случай электромагнитной индукции: возникновение индукционного тока в катушке при изменении силы тока в ней.

Для этого проведём опыт, изображённый на рисунке 147, а. При выполнении первой части опыта неоновая лампа L_n нам не понадобится, поэтому вынем её из патрона, оставив только две параллельные ветви: с реостатом и катушкой. (Обратите внимание на условное обозначение катушки с сердечником на схеме (рис. 147, б) и запомните его.)

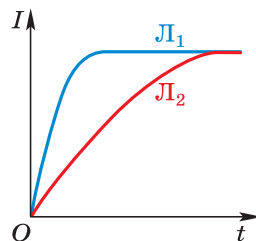
Замкнём цепь. Лампа L_1 загорается сразу, а L_2 — с заметным запаздыванием. Причина запаздывания заключается в следующем. При замыкании цепи силы токов I , I_1 и I_2 (см. рис. 147, б) начинают расти. Благодаря этому увеличиваются индукции B_1 и B_2 магнитных полей (создаваемых этими же токами I_1 и I_2) и магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , пронизывающие соответственно витки реостата и катушки. Возникает явление электромагнитной индукции. Только в этом случае проходящие сквозь реостат и катушку переменные потоки Φ_1 и Φ_2 создаются не



а)



б)



в)

Рис. 147. Возникновение индукционного тока в катушке при изменении силы тока в ней при замыкании цепи

внешними причинами (как было в опытах, рассмотренных в § 43), а благодаря изменению токов в самих этих устройствах.

В результате в реостате и в катушке возникают индукционные токи. Они препятствуют увеличению силы тока I_1 и I_2 (это следует из правила Ленца и правила правой руки). Но в катушке сила индукционного тока будет значительно больше, чем в реостате. Катушка имеет гораздо большее число витков и сердечник — она обладает большей *индуктивностью*, чем реостат.

Индуктивность (коэффициент самоиндукции) — это физическая величина, введённая для оценивания способности проводника противодействовать изменению силы тока в нём. Индуктивность катушки зависит от её формы, размеров, числа витков и наличия или отсутствия сердечника (например, железного). Обозначают индуктивность буквой L , её единица в СИ — *генри* (Гн). Строгое определение индуктивности вы узнаете в старших классах.

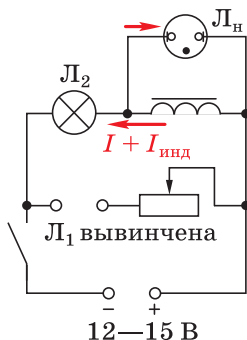


Рис. 148. Демонстрация явления самоиндукции при размыкании цепи

Чем больше сила индукционного тока, тем большее противодействие он оказывает изменению силы тока, созданного источником. Поэтому сила тока в ветви с катушкой возрастает медленнее, чем в ветви с реостатом, и лампа Л_2 загорается с опозданием (рис. 147, в).

Теперь посмотрим, что будет происходить при размыкании цепи. Для этого неоновую лампу $\text{Л}_\text{Н}$ поместим в патрон, а лампу Л_1 вывинтим, разомкнув тем самым участок цепи с реостатом (рис. 148).

При замыкании цепи загорится только лампа Л_2 . Неоновая лампа не включается потому, что напряжение, необходимое для её зажигания, значительно больше напряжения, подаваемого от источника тока.

Теперь разомкнём цепь — лампа накаливания гаснет, зато неоновая даёт яркую кратковременную вспышку. Уменьшение тока при размыкании цепи приводит к возникновению индукционного тока, противодействующего уменьшению тока в катушке, и напряжение на ней оказывается достаточным для зажигания лампы (и значительно превышающим напряжение источника!).

В проделанном опыте мы наблюдали явление самоиндукции — частный случай явления электромагнитной индукции.

Явление самоиндукции заключается в возникновении индукционного тока в проводнике при изменении силы тока в нём.

При этом возникающий индукционный ток называют **током самоиндукции**.

Ток самоиндукции возникает в любых проводниках, если сила тока изменяется. В катушках с относительно небольшим числом витков, не имеющих сердечника, и тем более в прямых проводниках (т. е. в элементах цепи, обладающих малой индуктивностью) сила тока самоиндукции обычно невелика и не оказы-

вает существенного влияния на процессы в электрической цепи.

Появление индукционного тока при размыкании цепи свидетельствует о том, что магнитное поле тока в катушке обладает энергией. Именно за счёт уменьшения энергии магнитного поля совершается работа по созданию индукционного тока. А накопилась эта энергия раньше, при замыкании цепи, когда за счёт энергии источника тока совершалась работа по преодолению тока самоиндукции, препятствующего увеличению тока в цепи, и его магнитного поля.

Энергия магнитного поля тока определяется по формуле

$$W_{\text{маг}} = \frac{Li^2}{2}$$

$$W_{\text{маг}} = \frac{Li^2}{2},$$

где i — сила тока в проводнике.



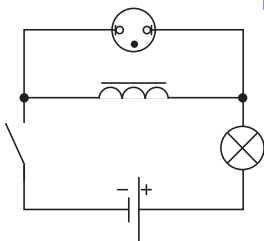
1. Какое явление изучалось на опыте, представленном на рисунках 147 и 148?
2. Расскажите о ходе каждой части опыта. Объясните наблюдаемые явления.
3. В чём заключается явление самоиндукции?
4. Может ли возникнуть ток самоиндукции в прямом проводнике с током? Если нет, то объясните почему; если да, то при каком условии.
5. За счёт уменьшения какой энергии совершалась работа по созданию индукционного тока при размыкании цепи?



Как уменьшить индуктивность катушки с железным сердечником при условии, что габариты обмотки (её длина и поперечное сечение) остаются постоянными?



УПРАЖНЕНИЕ 42



- В электрической цепи (рис. 149) напряжение, получаемое от источника тока, меньше напряжения зажигания неоновой лампы.

Может ли наблюдаться вспышка неоновой лампы при замыкании ключа; при размыкании ключа?

Что будет происходить с каждым элементом цепи (исключая источник тока и ключ) при замкнутом ключе; при замыкании ключа; при размыкании ключа?

Рис. 149

Рассмотрим ещё раз получение индукционного тока в катушке с помощью перемещения относительно неё постоянного магнита (см. рис. 138, а). Но теперь будем периодически двигать магнит вверх и вниз в течение нескольких секунд. Мы увидим, что при этом стрелка гальванометра отклоняется от нулевого деления то в одну, то в другую сторону. Это говорит о том, что сила индукционного тока в катушке и направление этого тока периодически меняются.

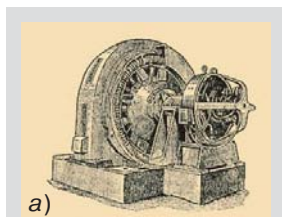
Электрический ток, периодически меняющийся со временем по величине и направлению, называют переменным током.

В осветительной сети наших домов и во многих отраслях промышленности используется именно переменный ток.

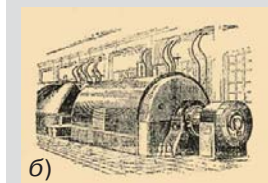
В настоящее время для получения переменного тока используют в основном *электро-механические индукционные генераторы*, т. е. устройства, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую. Индукционными они называются потому, что их действие основано на явлении электромагнитной индукции.

В § 43 рассматривался пример получения индукционного тока в плоском контуре при вращении внутри него магнита (см. рис. 140, б). На этом принципе и работает электро-механический генератор переменного тока. Неподвижную часть генератора, аналогичную контуру, называют *статором*, а вращающуюся, т. е. магнит, — *ротором*. В мощных промышленных генераторах вместо постоянного магнита используется электромагнит.

Статор промышленного генератора представляет собой стальную станину цилиндрической формы (станина — это основная несущая часть машины, на которой монтируются раз-



а)



б)

Генератор переменного тока:
а — внешний вид;
б — общий вид на электростанции вместе с паровой турбиной, приводящей ротор генератора во вращение

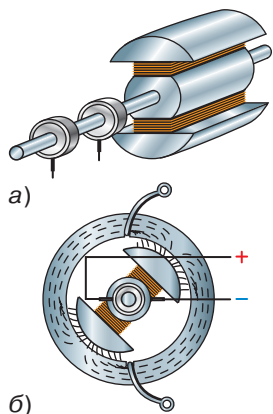


Рис. 150. Схема генератора переменного тока

личные рабочие узлы, механизмы и пр.). Во внутренней его части прорезаются пазы, в которые витками укладывается толстый медный провод. В витках и индуцируется переменный электрический ток при изменении пронизывающего их магнитного потока.

Магнитное поле создаётся ротором (рис. 150, а). Он представляет собой электромагнит: на стальной сердечник сложной формы надета обмотка, по которой протекает постоянный электрический ток. Ток к этой обмотке подводится через щётки и кольца от постороннего источника постоянного тока.

На рисунке 150, б приведена схема генератора переменного тока. Штрихами показано примерное расположение линий индукции магнитного поля ротора. При вращении ротора какой-либо внешней механической силой создаваемое им магнитное поле тоже вращается. При этом магнитный поток, пронизывающий витки обмотки статора (перпендикулярны плоскости рисунка 150, б), периодически меняется, в результате чего в них индуцируется переменный ток.

На тепловых электростанциях ротор генератора вращается с помощью паровой турбины, на гидроэлектростанциях — с помощью водяной турбины.

На рисунке 151, а изображён внешний вид мощного гидрогенератора, а на рисунке 151, б

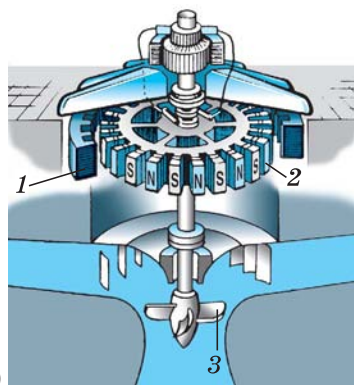
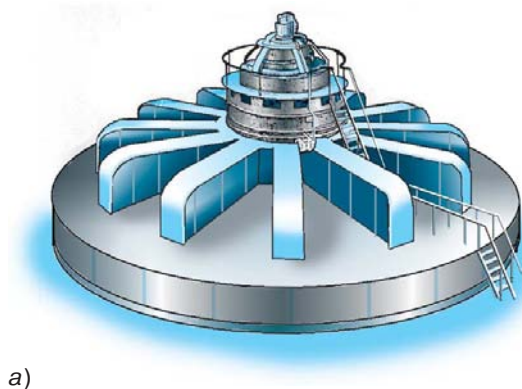


Рис. 151. Внешний вид и устройство мощного гидрогенератора

схематично показано его устройство, где цифрой 1 обозначен *статор*, цифрой 2 — *ротор*, а цифрой 3 — *водяная турбина*.

Ротор гидрогенератора имеет не одну, а несколько пар магнитных полюсов. Чем больше пар полюсов, тем больше частота переменного электрического тока, вырабатываемого генератором при данной скорости вращения ротора. Поскольку скорость вращения водяных турбин обычно невелика, то для создания тока стандартной частоты используют многополюсные роторы.

Стандартная частота переменного тока, применяемого в промышленности и осветительной сети в России и многих других странах, равна 50 Гц. Это означает, что на протяжении 1 с ток 50 раз течёт в одну сторону и 50 раз в другую. В некоторых странах (например, США) стандартная частота переменного тока равна 60 Гц.

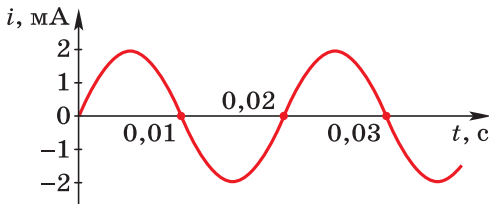


Рис. 152. График зависимости силы переменного тока от времени

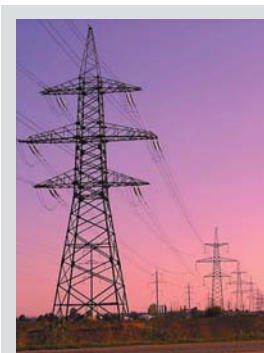
Сила тока, вырабатываемого генераторами переменного тока, меняется со временем по гармоническому закону (т. е. по закону синуса или косинуса). На рисунке 152 показан график изменения силы тока i со временем t .

Для передачи электроэнергии от электростанций в места её потребления служат линии электропередачи (ЛЭП). Чем дальше от электростанции находится потребитель тока, тем больше энергии Q тратится на нагревание проводов и тем меньше доходит до потребителя:

$$E_{\text{потребляемая}} = E_{\text{генерируемая}} - Q.$$

Уменьшение потерь электроэнергии при её передаче от электростанций к потребителям является важной задачей экономики.

Нагревание проводника при прохождении по нему электрического тока описывается законом Джоуля—Ленца ($Q = I^2 R t$). Он указывает на две



Современные высоковольтные ЛЭП



Первые ЛЭП

возможности уменьшения потерь энергии на нагревание проводов: уменьшение сопротивления R проводов и силы тока I в них. Заметим, что зависимость количества теплоты от сопротивления линейная, а от силы тока — квадратичная. Поэтому уменьшение силы тока — более эффективный способ уменьшения потерь.

Сопротивление проводов будет тем меньше, чем больше площадь S их поперечного сечения и чем меньше удельное сопротивление ρ металла, из которого они изготовлены

(так как $R = \frac{\rho l}{S}$). Провода делают из меди или алюми-

ния, так как среди относительно недорогих металлов они обладают наименьшим удельным сопротивлением. Увеличивать толщину проводов экономически невыгодно (ввиду увеличения расхода металла) и неудобно (из-за трудностей при их подвеске).

Поэтому существенного снижения потерь Q можно добиться только за счёт уменьшения силы тока I . Но при этом необходимо во столько же раз увеличить получаемое от генератора напряжение U , чтобы не снижать мощность тока P (так как $P = UI^1$). Без такого преобразования силы тока и напряжения передача электроэнергии на большие расстояния становится невыгодной из-за существенных потерь.

Решение этой важнейшей технической задачи стало возможным только после изобретения **трансформатора** — устройства, предназначенного для увеличения или уменьшения переменного напряжения и силы тока.

¹ U, I — так называемые *действующие* значения напряжения и силы переменного тока. Они равны соответственно напряжению и силе *постоянного* тока, выделяющего в проводнике каждую секунду столько же тепла, что и переменный ток. Действующие значения напряжения и силы переменного тока в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$.

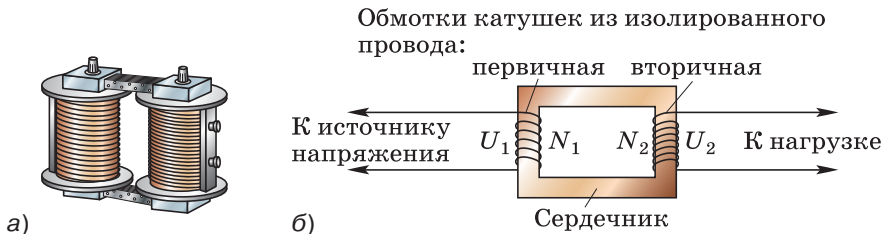


Рис. 153. Внешний вид и схема устройства повышающего трансформатора

Трансформатор был изобретён в 1876 г. русским учёным **Павлом Николаевичем Яблочковым**. В основе его работы лежит явление электромагнитной индукции. На рисунке 153, а показан внешний вид трансформатора, а на рисунке 153, б схематично изображены его основные части. Число витков в обмотках трансформатора различно: в данном случае $N_2 > N_1$.

При протекании в первичной обмотке трансформатора переменного тока витки вторичной обмотки пронизывает переменный магнитный поток. При этом на концах вторичной обмотки возникает переменное напряжение U_2 .

Величина U_2 определяется из соотношения:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \text{ или } U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1.$$

Значит, при $N_2 > N_1$ трансформатор будет *повышающим* (так как $U_2 > U_1$), а при $N_2 < N_1$ — *понижающим* (в данном случае $U_2 < U_1$).

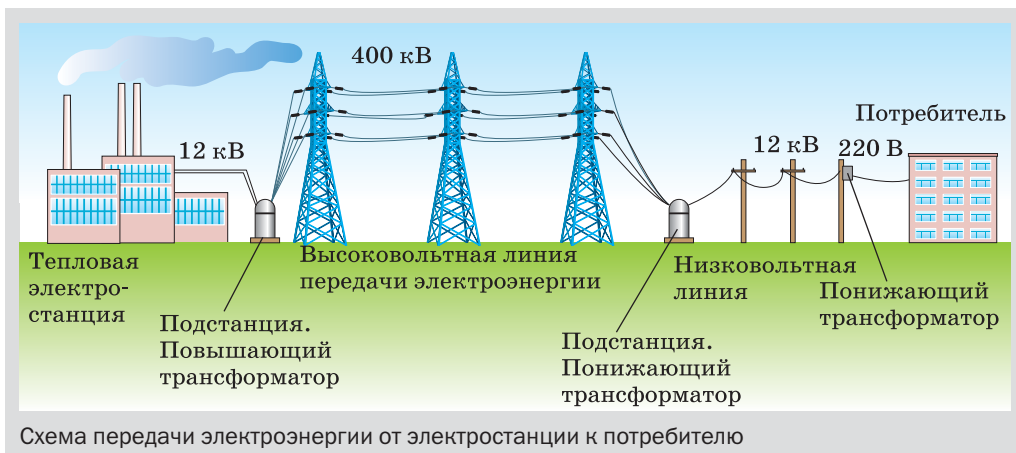
Теперь вернёмся к вопросу о передаче электроэнергии от электростанции к месту её потребления. Напряжение, вырабатываемое генератором, обычно не превышает 25 кВ. А для оптимальной передачи электроэнергии на большие расстояния требуется напряжение порядка сотен киловольт. Поэтому ток с электростанции сначала подаётся на расположенную неподалёку повышающую трансформаторную подстанцию, где напряжение повышается до нескольких сотен киловольт (в боль-



ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ

(1847—1894)

Русский электротехник и изобретатель. Изобрёл дуговую лампу («свеча Яблочкова»), сконструировал генератор переменного тока, трансформатор, сделал изобретения в области электрических машин и химических источников тока



Внешний вид силового масляного трансформатора

шинстве случаев оно не превышает 750 кВ), и под таким напряжением подаётся в ЛЭП. Поскольку такое высокое напряжение не может быть предложено потребителю, то в конце линии его поочерёдно на несколько трансформаторных подстанций, понижающих напряжение до 380 или 220 В, а затем — на предприятия или в жилые дома.

Трансформаторы нашли широкое применение в быту. Например, при подзарядке сотового телефона имеющийся в зарядном устройстве трансформатор понижает напряжение, полученное из осветительной сети и равное 220 В, до 5,5 В, пригодного для телефона. В телевизоре имеется несколько трансформаторов (как понижающих, так и повышающих), поскольку для питания различных его узлов требуется напряжение от 1,5 В до 25 кВ.



1. Какой электрический ток называют переменным? С помощью какого простого опыта его можно получить?
2. Где используют переменный электрический ток?
3. Расскажите об устройстве и принципе действия промышленного генератора.
4. Почему в гидрогенераторах используют многополюсные роторы?
5. По какому физическому закону можно определить потери электроэнергии в ЛЭП и за счёт чего их можно уменьшить?
6. Для чего при уменьшении силы тока во столько же раз повышают его напряжение перед подачей в ЛЭП?
7. Расскажите об устройстве, принципе действия и применении трансформатора.



УПРАЖНЕНИЕ 43

1. Электростанции России вырабатывают переменный ток частотой 50 Гц. Определите период этого тока.
- 2*. По графику (см. рис. 152) определите период, частоту и амплитуду колебаний силы тока i .

Это любопытно...

Из истории электротехники

Важнейшим достоинством электроэнергии является удобство её транспортировки. Однако вплоть до второй половины XIX в. передать электроэнергию большой мощности не удавалось. Лишь в 1874 г. русский военный инженер Ф. А. Пироцкий впервые осуществил передачу электроэнергии мощностью 6 кВт на расстояние до одного километра на Волковом поле, вблизи Петербурга. Достижения Ф. А. Пироцкого заинтересовали русского учёного Д. А. Лачинова, который вскоре впервые в мире теоретически обосновал передачу электроэнергии на большое расстояние. В своей работе, помещённой в русском журнале «Электричество», Д. А. Лачинов доказал, что при передаче электроэнергии по проводам потери энергии уменьшаются с повышением напряжения. Чтобы передать энергию мощностью в сотни и тысячи киловатт, требовалось огромное напряжение в сотни тысяч вольт. Получить такое напряжение с помощью генератора постоянного тока оказалось невозможным.

Выход из создавшегося тупика увидели русские электротехники П. Н. Яблочков, В. Н. Чиколев, Ф. А. Пироцкий и другие, которые стали пропагандировать применение переменного тока — основу широкой электрификации. К этому времени лаборантом Московского университета И. Ф. Усагиным был усовершенствован трансформатор (1882), с помощью которого можно было изменять напряжение переменного тока в широких пределах. Передача представлялась следующим образом: ток из генератора переменного тока поступает в повышающий трансформатор, а затем под очень высоким напряжением идёт по линии передачи. На другом конце линии ток поступает в понижающий трансформатор, а затем идёт к потребителям.

Теперь именно так и осуществляется передача электроэнергии, но в те времена для окончательного решения поставленной задачи нужно было усовершенствовать электродвигатель переменного тока. Эту задачу смог блестяще решить русский изобретатель М. О. Доливо-Добровольский. В 1889 г. он изобрёл новый тип электродвигателя переменного тока (мотор трёхфазного тока), а затем сконструировал генератор и трансформатор трёхфазного тока. М. О. Доливо-Добровольский теоретически и практически доказал, что трёхфазный ток создаёт вращающееся магнитное

поле, и на основе этого построил двигатель переменного тока, получивший название «асинхронного». В 1891 г. М. О. Доливо-Добровольский осуществил передачу электроэнергии трёхфазным током мощностью 300 кВт на расстояние 175 км, применяя трансформатор трёхфазного тока, причём потери мощности не превышали 25%.

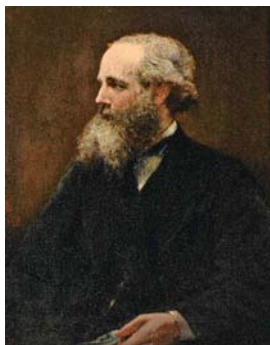
Российские учёные одержали крупнейшую победу. На исходе XIX в. они были признанными лидерами в области электротехники. Многометровые высоковольтные линии передачи переменного тока на сотни километров в России появились в 1902 г. В 1919 г. М. О. Доливо-Добровольский высказал мысль, что в линиях сверхдальних передач целесообразно применять постоянный ток высокого напряжения. Но технически эта задача остаётся очень сложной. Большинство современных линий электропередачи по-прежнему используют переменный ток.



Высоковольтные ЛЭП постоянного тока позволяют передавать электроэнергию с меньшими потерями, чем ЛЭП переменного тока. Как вы думаете, с чем связано повсеместное применение именно ЛЭП переменного тока?

§ 47

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ



ДЖЕЙМС МАКСВЕЛЛ

(1831—1879)

Английский физик. Теоретически предсказал существование электромагнитных волн, определил, что в вакууме они должны распространяться со скоростью света. Создал теорию электромагнитного поля

Явление электромагнитной индукции было открыто Фарадеем в 1831 г.

В том же году в Англии родился *Джеймс Максвелл*, ставший впоследствии учёным и сделавший важнейшее научное открытие, которое позволило глубже понять сущность явления электромагнитной индукции.

Пусть неподвижный замкнутый проводник помещён в изменяющееся во времени магнитное поле. Благодаря явлению электромагнитной индукции в проводнике возникнет индукционный ток. Но какие силы заставляют электроны двигаться? Поскольку проводник неподвижен, магнитное поле сделать это не может. Остаётся предположить, что электроны приводятся в движение электрическим полем.

Предположение о возникновении электрического поля в результате из-

менения магнитного сразу вызвало у учёных ряд вопросов. Например: отличается ли оно от поля, созданного неподвижными электрическими зарядами?

Возникает ли это поле только в проводнике или существует и в пространстве вокруг него?

Ответы на эти и другие вопросы были получены в 1865 г., когда Максвелл создал теорию электромагнитного поля. Согласно этой теории, *всякое изменение со временем магнитного поля приводит к возникновению переменного электрического поля, а всякое изменение со временем электрического поля порождает переменное магнитное поле.*

Таким образом, источником электрического поля могут быть не только электрические заряды, но и переменные магнитные поля. В первом случае силовые линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Такое поле называют **потенциальным**. Во втором случае электрическое поле является **вихревым** — его силовые линии замкнуты, подобно линиям индукции магнитного поля. Вихревое электрическое поле и является причиной возникновения индукционного тока в неподвижном проводнике. Проводник, замкнутый на гальванометр, играет лишь роль индикатора, обнаруживающего в данной области пространства электрическое поле.

У магнитного поля также могут быть два источника: электрический ток и переменное электрическое поле. В обоих случаях магнитные линии замкнуты. Магнитное поле всегда вихревое.

Электрическое и магнитное поля не являются обособленными физическими объектами, они тесно взаимосвязаны. Как известно, покоящийся заряд создаёт только электрическое поле. Но ведь заряд покоится лишь относительно определённой системы отсчёта. Относительно других систем отсчёта он будет двигаться и, сле-

довательно, создавать и магнитное поле. Точно так же лежащий на столе магнит создаёт только магнитное поле. Но движущийся относительно него наблюдатель обнаружит и электрическое поле в соответствии с явлением электромагнитной индукции. *Электрическое и магнитное поля являются двумя различными проявлениями одного физического объекта — электромагнитного поля.* Разделение единого электромагнитного поля на части, представляющие собой электрическое и магнитное поля, связано с выбором системы отсчёта.

Среди бесчисленных, очень интересных и важных следствий теории Максвелла одно заслуживает особого внимания. Это вывод о конечности скорости распространения электромагнитных взаимодействий.

Долгое время считалось, что взаимодействие между электрическими зарядами осуществляется непосредственно через пустое пространство. При этом действие распространяется на любое расстояние мгновенно. По Максвеллу же дело обстоит иначе и много сложнее. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле уже на большем расстоянии от заряда, и т. д. Таким образом, перемещение заряда вызывает «всплеск» электромагнитного поля, который, распространяясь, охватывает всё большие и большие области пространства. Лишь в тот момент, когда «всплеск» достигает второго заряда, действующая на него сила изменяется. Процесс распространения электромагнитного возмущения протекает с конечной, хотя и очень большой, скоростью.

Созданная Максвеллом теория, на 22 года опередившая свои экспериментальные подтверждения, считается величайшим из научных открытий, роль которого в развитии науки и техники трудно переоценить.



1. Кем и когда была создана теория электромагнитного поля и в чём заключалась её суть? **2.** Что служит источником электромагнитного поля? **3.** Чем отличаются силовые линии вихревого электрического поля от силовых линий электростатического? **4.** Опишите механизм возникновения индукционного тока, опираясь на знание о существовании электромагнитного поля.



УПРАЖНЕНИЕ 44

- В опыте, изображённом на рисунке 139, при замыкании ключа сила тока, протекающего через катушку *A*, в течение некоторого промежутка времени увеличивалась. При этом в цепи катушки *C* возникал кратковременный ток. Отличаются ли чем-нибудь электрические поля, под действием которых возникали токи в катушках *A* и *C*? Существовали бы эти поля в момент замыкания ключа, если бы не было катушки *C* с гальванометром?

§ 48

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Из созданной Максвеллом теории можно сделать вывод о том, что быстропеременное электромагнитное поле должно распространяться в пространстве в виде поперечных волн. Причём эти волны могут существовать не только в веществе, но и в вакууме. Опираясь исключительно на теоретические выводы, Максвелл определил также, что электромагнитные волны должны распространяться в вакууме со скоростью 300 000 км/с. Именно с этой скоростью распространяется в вакууме свет (скорость света была измерена задолго до открытия Максвелла).

Вы уже знаете, что в механических волнах, например в звуковых, энергия передаётся от одних частиц среды к другим. При этом частицы приходят в колебательное движение, т. е. их смещение от положения равновесия периодически меняется. Для передачи звука обязательно нужна вещественная среда.

В связи с тем что электромагнитные волны распространяются в веществе и в вакууме, возникает вопрос: что совершает колебания в электромагнитной волне, т. е. какие физические величины периодически меняются в ней?

Электромагнитная волна представляет собой систему порождающих друг друга и распространяющихся в пространстве переменных электрического и магнитного полей.

Напомним, что количественной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} . Основная количественная характеристика электрического поля — напряжённость электрического поля \vec{E} .

Когда говорят, что магнитное и электрическое поля меняются, то это означает, что меняются соответственно вектор индукции магнитного поля \vec{B} и вектор напряжённости электрического поля \vec{E} .

В электромагнитной волне именно векторы \vec{B} и \vec{E} периодически меняются по модулю и по направлению, т. е. колеблются.

Если электрические заряды неподвижны, то создаваемое ими электрическое поле остаётся постоянным во времени. Если заряды движутся равномерно (случай постоянного тока), то они создают постоянное магнитное поле. В обоих этих случаях электрическое и магнитное поля не изменяются с течением времени, а значит, и электромагнитная волна возникнуть не может. *Электромагнитные волны могут возбуждаться только ускоренно движущимися электрическими зарядами.*

Рассмотрим излучение заряда, совершающего гармонические колебания около начала координат вдоль оси X с частотой ν . Во все стороны от заряда бегут электромагнитные волны, в частности вдоль оси Z . На рисунке 154 изображены вектор напряжённости электрического поля \vec{E} и вектор индукции магнитного поля \vec{B} электромагнитной волны в один и тот же момент времени. Это «моментальный снимок» волны, распространяющейся в направлении оси Z . Плоскость, проведённая через век-

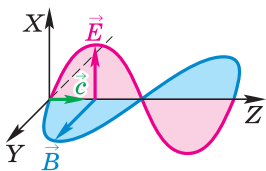


Рис. 154. Модель электромагнитной волны: \vec{E} — напряжённость электрического поля; \vec{B} — индукция магнитного поля; \vec{c} — скорость волны

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$$

торы \vec{B} и \vec{E} в любой точке, перпендикулярна направлению распространения волны, что говорит о поперечности волны.

За время, равное периоду колебаний, волна переместится вдоль оси Z на расстояние, равное длине волны. Для электромагнитных волн справедливы те же соотношения между длиной волны λ , её скоростью c , периодом T и частотой ν колебаний, что и для механических волн:

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}.$$

Максвелл не только научно обосновал возможность существования электромагнитных волн, но и указал, что *для излучения мощных электромагнитных волн необходимо, чтобы колебания векторов \vec{E} и \vec{B} происходили с достаточно высокой частотой.*

В 1888 г. Герц экспериментально получил и зарегистрировал электромагнитные волны. В результате опытов Герца были также обнаружены все свойства электромагнитных волн, теоретически предсказанные Максвеллом.

Всё окружающее нас пространство буквально пронизано электромагнитными волнами различных частот. В настоящее время все электромагнитные волны разделены по длинам волн (и соответственно по частотам) на шесть основных диапазонов, которые представлены на рисунке 155.

Границы диапазонов весьма условны, поэтому, как видно из рисунка, в большинстве случаев соседние диапазоны несколько перекрывают друг друга.

Электромагнитные волны разных частот отличаются друг от друга проникающей способностью, скоро-



ГЕНРИХ ГЕРЦ

(1857—1894)

Немецкий физик, один из основоположников электродинамики. Экспериментально доказал существование электромагнитных волн

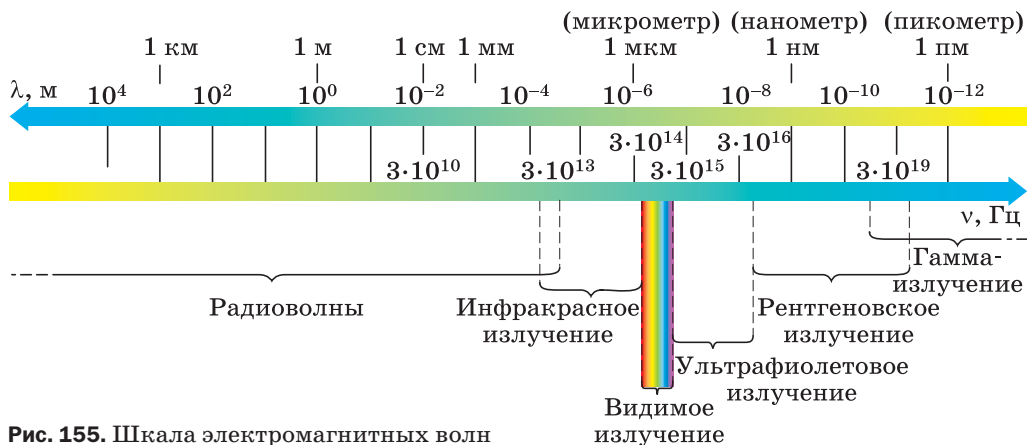


Рис. 155. Шкала электромагнитных волн

стью распространения в веществе, видимостью, цветностью и некоторыми другими свойствами.

Они могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на живые организмы. Например, инфракрасное, т. е. тепловое, излучение играет определяющую роль в поддержании жизни на Земле, поскольку люди, животные и растения могут существовать и нормально функционировать только при определённых температурах.

Видимый свет даёт нам информацию об окружающем мире и возможность ориентироваться в пространстве. Он необходим также для протекания процесса фотосинтеза в растениях, в результате чего выделяется кислород, необходимый для дыхания живых организмов.

Влияние на человека ультрафиолетового излучения (вызывающего загар) в большой степени определяется интенсивностью и продолжительностью облучения. В допустимых дозах оно повышает сопротивляемость организма человека к различным заболеваниям, в частности инфекционным. Превышение допустимой дозы может вызвать ожоги кожи, развитие онкологических заболеваний, ослабление имму-

нитета, повреждение сетчатки глаз. Глаза можно защитить с помощью стеклянных очков (как тёмных, так и прозрачных), так как стекло поглощает значительную часть ультрафиолетовых лучей.

Вы знакомы и с рентгеновским излучением, в частности с его широким применением в медицине — флюорографическое обследование или рентгеновский снимок наверняка делали каждому из вас. Но слишком большие дозы или частые обследования с помощью рентгеновских лучей могут вызвать серьёзные заболевания.

Генерирование электромагнитных волн имеет огромное научное и практическое значение. В этом можно убедиться на примере всего лишь одного диапазона — радиоволн, применяемых для телевизионной и радиосвязи, в радиолокации (т. е. для обнаружения объектов и измерения расстояния до них), в радиоастрономии и других сферах деятельности.



1. Какие выводы относительно электромагнитных волн можно сделать из теории Максвелла?
2. Какие физические величины периодически меняются в электромагнитной волне?
3. Какие соотношения между длиной волны, её скоростью, периодом и частотой колебаний справедливы для электромагнитных волн?
4. Как должна двигаться заряженная частица, чтобы она излучала электромагнитные волны?
5. Когда и кем были впервые получены электромагнитные волны?
6. Приведите примеры применения разных диапазонов электромагнитных волн и их воздействия на живые организмы.



УПРАЖНЕНИЕ 45

1. На какой частоте суда передают сигнал бедствия SOS, если по международному соглашению длина радиоволны должна быть 600 м?
2. Радиосигнал, посланный с Земли на Луну, может отразиться от поверхности Луны и вернуться на Землю. Предложите способ измерения расстояния между Землёй и Луной с помощью радиосигнала.

Указание: задача решается таким же методом, каким измеряется глубина моря с помощью эхолокации (см. § 34).

3. Можно ли измерить расстояние между Землёй и Луной с помощью звуковой или ультразвуковой волны? Ответ обоснуйте.

Радиовещание (т. е. передача звуковой информации на большие расстояния) осуществляется посредством электромагнитных волн, излучаемых антенной радиопередающего устройства. Напомним, что источником электромагнитных волн являются ускоренно движущиеся заряженные частицы. Так, электромагнитные волны излучаются антеннами при возбуждении в них колебаний свободных электронов. Такие колебания называют **электромагнитными** (поскольку они порождают электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве в виде электромагнитных волн).

По мере удаления от антенны амплитуда электромагнитной волны убывает, однако мощность излучения (энергия, излучаемая в единицу времени) пропорциональна четвёртой степени частоты: $P \sim \nu^4$. Поэтому для создания мощных электромагнитных волн, которые можно регистрировать на больших расстояниях от излучающей антенны, используют колебания достаточно большой частоты (обычно не меньше 0,1 МГц (10^5 Гц)). Колебания таких больших частот невозможно получить от генератора переменного электрического тока. Поэтому они подаются на антенну от *генератора высокочастотных электромагнитных колебаний*, имеющегося в каждом радиопередающем устройстве.

Одной из основных частей генератора является **колебательный контур** — колебательная система, в которой могут существовать свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур состоит из конденсатора (или батареи конденсаторов) и проволочной катушки.

Получить свободные электромагнитные колебания и удостовериться в их существовании

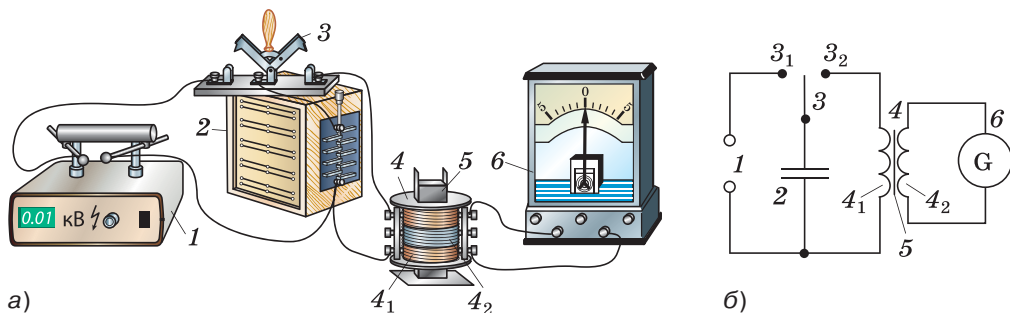


Рис. 156. Установка для получения свободных электромагнитных колебаний

можно с помощью установки, изображённой на рисунке 156.

Катушка 4 с сердечником 5 (рис. 156, а) состоит из двух обмоток: первичной 4_1 (из 3600 витков) и вторичной 4_2 (расположенной поверх первичной в средней её части и имеющей 40 витков).

Первичная обмотка катушки и батарея конденсаторов 2, соединённые друг с другом через переключатель 3, составляют *колебательный контур*. Вторичная обмотка замкнута на гальванометр 6, который будет регистрировать возникновение колебаний в контуре.

Поставим переключатель в положение 3_1 (рис. 156, б), соединив батарею конденсаторов с источником постоянного тока 1. Батарея зарядится от источника. Перекинем переключатель в положение 3_2 , соединив батарею с катушкой. При этом стрелка гальванометра совершит несколько затухающих колебаний, отклоняясь от нулевого деления то в одну, то в другую сторону, и остановится на нуле. Колебания в контуре затухающие, так как часть энергии, запасённой в конденсаторе во время зарядки, тратится, согласно закону Джоуля—Ленца, на нагревание проводов.

Чтобы понять, почему происходят эти колебания тока, рассмотрим процессы в идеальном, т. е. не имеющем сопротивления, колебательном контуре. Обратимся к рисунку 157. Пусть

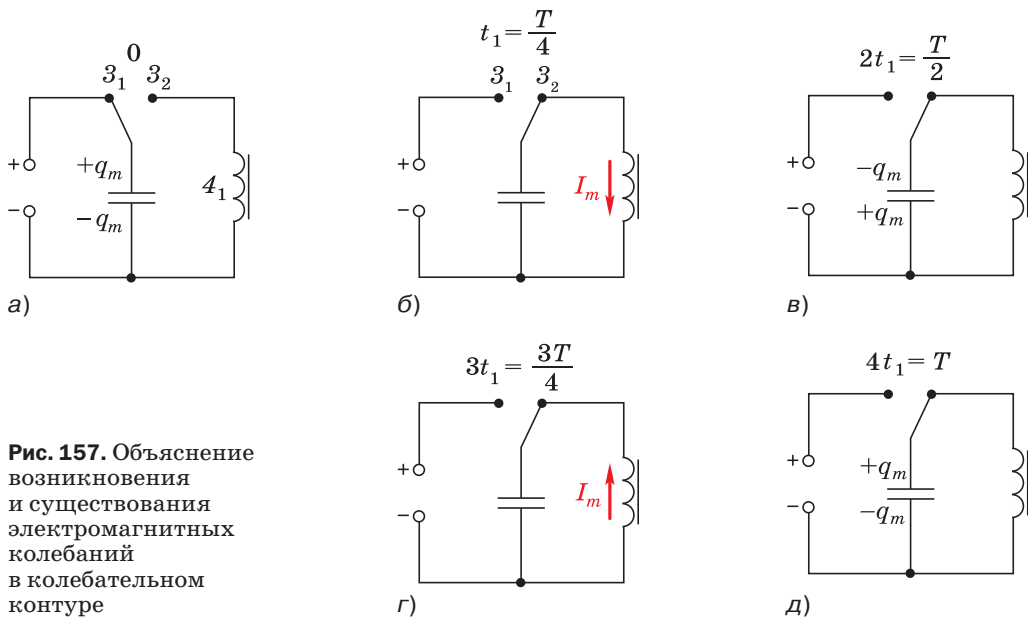


Рис. 157. Объяснение возникновения и существования электромагнитных колебаний в колебательном контуре

при зарядке от источника тока (переключатель в положении 3_1) конденсатор получил некоторый максимальный заряд q_m . Допустим, при этом верхняя его обкладка зарядилась положительно, а нижняя — отрицательно (рис. 157, а). Между обкладками возникло напряжение U_m и электрическое поле, обладающее энергией $E_{эл\ m}$.

При замыкании на катушку (переключатель в положении 3_2) в момент, который примем за начало отсчёта времени, конденсатор начинает разряжаться, и в контуре появляется электрический ток. Сила тока увеличивается постепенно, так как возникший в катушке ток самоиндукции направлен против тока, созданного разряжающимся конденсатором.

Через некоторый промежуток времени t_1 от начала разрядки конденсатор полностью разрядится — его заряд, напряжение между обкладками и энергия электрического поля будут равны нулю (рис. 157, б). Но, согласно закону сохранения энергии, энергия электрического поля не исчезла — она перешла в энергию маг-

нитного поля тока катушки, которая в этот момент достигает максимального значения $E_{\text{маг } m}$. Наибольшему значению энергии соответствует и наибольшая сила тока I_m .

Поскольку конденсатор разряжен, сила тока в контуре начинает уменьшаться. Но теперь ток самоиндукции направлен в ту же сторону, что и ток разряжавшегося конденсатора, и препятствует его уменьшению. Благодаря току самоиндукции к моменту времени $2t_1$ от начала разрядки конденсатор перезарядится: его заряд вновь будет равен q_m , но теперь верхняя обкладка будет заряжена отрицательно, а нижняя — положительно (рис. 157, *в*).

Понятно, что в момент времени $3t_1$ конденсатор вновь будет разряжен (рис. 157, *г*), а в момент времени $4t_1$ будет заряжен так же, как в момент начала разрядки (рис. 157, *д*). Величина заряда на обкладках конденсатора вернулась к первоначальному значению, так как мы рассмотрели идеальный контур, сопротивление которого равно нулю.

За промежуток времени, равный $4t_1$, произошло одно полное колебание. Значит, $T = 4t_1$, где T — период колебаний (а t_1 , $2t_1$, $3t_1$ — соответственно четверть, половина и три четверти периода).

При периодическом изменении в катушке 4_1 силы тока и его направления соответственно меняется и создаваемый этим током магнитный поток, пронизывающий катушку 4_2 . При этом в ней возникает переменный индукционный ток, регистрируемый гальванометром.

Исходя из того что в реальном опыте (см. рис. 156) стрелка гальванометра совершила несколько затухающих колебаний и остановилась на нуле, можно сделать вывод, что электромагнитные колебания тоже были затухающими. Энергия, полученная контуром от источника тока, постепенно расходовалась на нагревание проводящих частей контура. Когда запас энергии иссяк, колебания прекратились.

Напомним, что колебания, происходящие только благодаря начальному запасу энергии, называются свободными. Если сопротивление катушки и соединительных проводов пренебрежимо мало, свободные колебания в контуре можно считать незатухающими. Формула для определения периода свободных незатухающих электромагнитных колебаний была получена английским физиком **Уильямом Томсоном** (1824—1907) в 1853 г. Она носит название **формулы Томсона** и выглядит так:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Из данной формулы следует, что период колебательного контура определяется параметрами составляющих его элементов: индуктивностью катушки и ёмкостью конденсатора. Например, при уменьшении ёмкости или индуктивности период колебаний должен уменьшиться, а их частота — увеличиться. Проверим это на опыте. Уменьшим ёмкость батареи, отключив от неё несколько конденсаторов. Мы увидим, что колебания стрелки гальванометра участились.

В начале параграфа отмечалось, что подаваемые в антенну высокочастотные колебания необходимы для создания электромагнитных волн. Но для того чтобы волна излучалась в течение длительного времени, нужны незатухающие колебания. Для создания в контуре незатухающих колебаний необходимо восполнять потери энергии, периодически подключая конденсатор к источнику тока. В генераторе это осуществляется автоматически.



1. Для чего электромагнитные волны подаются в антенну?
2. Почему в радиовещании используются электромагнитные волны высокой частоты?
3. Что представляет собой колебательный контур?
4. Расскажите о цели, ходе и наблюдаемом результате опыта, изображённого на рисунке 156. Каким образом гальванометр мог регистрировать

происходящие в этом контуре колебания? **5.** Какие преобразования энергии происходят в результате электромагнитных колебаний? **6.** Почему ток в катушке не прекращается в тот момент, когда конденсатор разряжен? **7.** От чего зависит собственный период колебательного контура? Как его можно изменить?



УПРАЖНЕНИЕ 46

- Колебательный контур состоит из конденсатора переменной ёмкости и катушки. Как получить в этом контуре электромагнитные колебания, периоды которых отличались бы в 2 раза?

§ 50

ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ



**АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ
ПОПОВ**

(1859—1906)

Русский физик, электротехник, изобретатель радио. Сконструировал передатчик электромагнитных волн. Изобрёл приёмную антенну, построил первый в мире радиоприёмник

Передачу и приём информации посредством электромагнитных волн называют **радиосвязью**. На возможность использования электромагнитных волн для передачи радиосигналов¹ впервые указал **Александр Степанович Попов**. В 1896 г. при помощи сконструированных им передатчика и приёмника радиосигналов передал первую в мире радиограмму, состоящую из двух слов «Генрих Герц».

Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание в 1913 г. генератора незатухающих колебаний. Кроме передачи радиосигналов, стала возможной надёжная и высококачественная радиотелефонная связь — передача звуковой информации, например речи и музыки, с помощью электромагнитных волн.

Для получения целостного представления об этом процессе обратимся к блок-схеме, представленной на рисунке 158.

На рисунке 158, а изображено *передающее устройство*, состоящее из генератора высокочастотных колеба-

¹ Радиосигналы — электромагнитные волны, излучаемые в течение коротких промежутков времени в диапазоне частот от 10^4 до 10^{10} кГц.

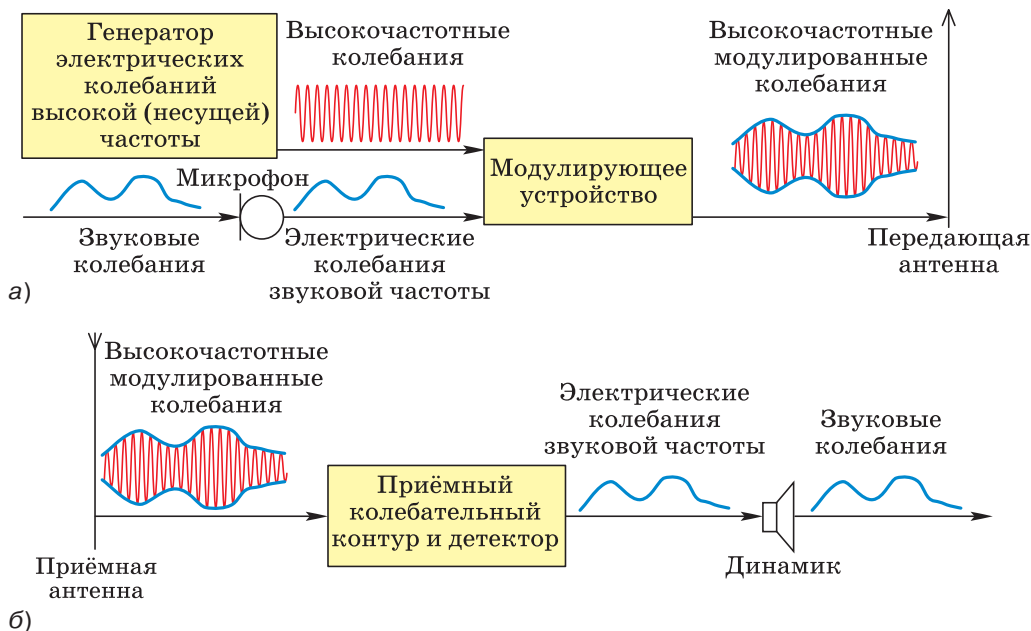


Рис. 158. Блок-схема процесса радиосвязи

ний, микрофона, модулирующего устройства и передающей антенны.

В микрофон поступают звуковые колебания (речь, музыка и т. д.). Они преобразуются микрофоном в электрические колебания такой же формы, какую имеют звуковые. Из микрофона низкочастотные электрические колебания поступают в модулирующее устройство. Туда же из генератора подаются высокочастотные колебания постоянной амплитуды.

В модулирующем устройстве амплитуду высокочастотных колебаний изменяют (модулируют) с помощью электрических колебаний звуковой частоты. В результате амплитуда становится переменной, причём меняется она точно так же, как и поступающие из микрофона электрические колебания. Такие высокочастотные *модулированные* по амплитуде колебания несут в себе информацию о форме звукового сигнала. Поэтому частота высокочастотных колебаний называется *несущей*.

Под воздействием высокочастотных модулированных колебаний в передающей антенне возникает переменный ток высокой частоты. Этот ток порождает в пространстве вокруг антенны электромагнитное поле, которое распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн и достигает антенн радиоприёмных устройств.

Вы уже знаете о том, что мощность электромагнитной волны пропорциональна четвёртой степени её частоты: $P \sim \nu^4$.

Электромагнитные волны звуковых, т. е. низких, частот (от 16 до 20 000 Гц) имеют малую мощность и после излучения очень быстро затухают. Этим и вызвана необходимость использования модулированных радиоволн, которые благодаря высокой несущей частоте распространяются на большие расстояния и при этом содержат информацию о форме передаваемых звуковых колебаний.

Как видно из рисунка 158, б, радиоприёмное устройство состоит из приёмной антенны, приёмного резонирующего колебательного контура и *детектора* — элемента, пропускающего переменный ток только в одном направлении.

В приёмную антенну поступают волны от множества радиостанций. Но каждая радиостанция осуществляет вещание только на определённой, отведённой ей несущей частоте.

Настраивая свой радиоприёмник на частоту нужной радиостанции, вы меняете собственную частоту имеющегося в приёмнике колебательного контура так, чтобы она была равна несущей частоте данной радиостанции, т. е. чтобы контур был настроен в резонанс с колебаниями, генерируемыми на данной радиостанции. При этом амплитуда колебаний выбранной радиостанции в контуре вашего приёмника будет максимальной по сравнению с амплитудами

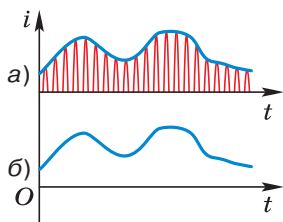


Рис. 159. Графики высокочастотных модулированных колебаний и звуковых колебаний

колебаний, поступивших от радиостанций, вещающих на других несущих частотах. В этом заключается второе назначение несущей частоты — она обеспечивает возможность настройки на частоту нужной радиостанции.

Принятые колебания сначала усиливают. Затем для преобразования высокочастотных модулированных колебаний в звуковые производят *детектирование*, т. е. процесс, обратный модуляции. Детектирование проводится в два этапа: сначала с помощью детектора (представляющего собой элемент с односторонней проводимостью) из высокочастотных модулированных колебаний получают высокочастотный пульсирующий ток (рис. 159, а), а затем в динамике этот ток сглаживается и преобразуется в колебания звуковых частот (рис. 159, б).

При передаче телевизионных программ высокочастотные колебания модулируются не только звуковым, но и видеосигналом. Это осуществляется с помощью телевизионной передающей трубки, которая преобразует оптическое изображение в электромагнитные колебания. Модулированные таким образом высокочастотные колебания заключают в себе информацию и о звуке, и об изображении.

В телевидении используются более высокие (порядка миллиардов герц) несущие частоты.



1. Что называют радиосвязью? 2. Приведите 2—3 примера использования линий радиосвязи. 3. Используя рисунки 158 и 159, расскажите о принципах осуществления радиотелефонной связи. 4. Частота каких колебаний называется несущей? 5. В чём заключается процесс амплитудной модуляции электрических колебаний? 6. Почему в радиосвязи не используются электромагнитные волны звуковых частот? 7. В чём заключается процесс детектирования колебаний?



Какие свойства человеческого зрения необходимо учитывать при создании телевизионных приёмников?



УПРАЖНЕНИЕ 47

- Период колебаний зарядов в антенне, излучающей радиоволны, равен 10^{-7} с. Определите частоту этих радиоволн.



Изучая в 8 классе распространение, отражение и преломление света, мы не задавались вопросом о его природе. Теперь уместно было бы обратиться к этому вопросу в связи с изучением электромагнитных волн.

С давних пор существовало два взгляда на природу света. Одни учёные считали, что свет представляет собой волну, другие рассматривали свет как поток частиц (корпускул). Только в начале XIX в. были поставлены эксперименты, доказывающие, что свет обладает волновыми свойствами. Прежде чем рассмотреть эти доказательства, нам следует познакомиться с важным явлением, характерным для любых волновых процессов, — **интерференцией волн**. Знакомство с интерференцией начнём с наблюдения за волнами на поверхности жидкости.

Над поверхностью воды установим стержень с насадкой, состоящей из пластинки с прикреплёнными к ней двумя проволочками. При вертикальных колебаниях стержня концы проволочек будут периодически погружаться в воду и возбуждать колебания, распространяющиеся по её поверхности в виде волн одинаковой частоты. Каждая из проволочек возбуждает свою систему волн. Две системы волн, налагаясь одна на другую, образуют на поверхности воды картину, показанную на рисунке 160.

Некоторые точки поверхности воды (например, точки, принадлежащие линии AA' на рис. 160) остаются почти неподвижными. В то же время существуют точки, амплитуда колебаний которых особенно велика (например, точки, принадлежащие линии BB' на рис. 160). Такую не меняющуюся со временем картину чередующихся максимумов и минимумов амплитуд колебаний называют **интерференционной картиной**. Рассмотрим механизм её образования.

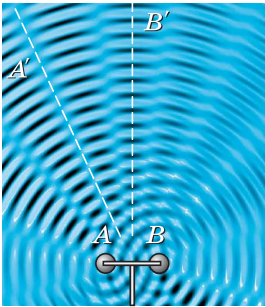


Рис. 160. Интерференционная картина на поверхности воды

Точка поверхности воды, находящаяся на пути двух волн, участвует одновременно в колебаниях обеих волн, т. е. её колебания представляют собой сумму колебаний, вызванных каждой волной в отдельности. Пусть в некоторый момент времени в некоторую точку обе волны, имеющие одинаковую частоту, приходят в противоположных фазах (гребень одной волны сходится с впадиной другой).

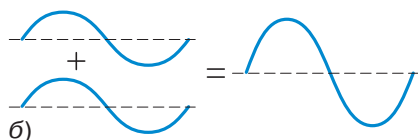
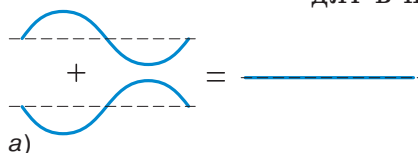


Рис. 161. Сложение колебаний

Колебания при этом взаимно ослабляются (рис. 161, а). Если разность фаз этих волн не будет меняться со временем, то ослабление будет происходить в каждый момент времени. Мы увидим, что волнение воды в данном месте почти отсутствует. Наоборот, в том месте, куда обе волны приходят в одинаковой фазе, будут всё время происходить усиленные колебания поверхности воды (рис. 161, б).

Интерференционная картина возникает в том случае, *когда налагающиеся волны имеют одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз в каждой точке*. В рассмотренном опыте это условие выполнено, поскольку обе проволоочки прикреплены к одной и той же колеблющейся пластинке.

Явление наложения волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний, называют интерференцией.

Явление интерференции волн присуще не только волнам на поверхности жидкости, но и любым другим видам волн. Так, если установить в комнате два громкоговорителя, подключённых к общему звуковому генератору, то, перемещаясь по комнате на небольшие расстояния, можно обнаружить, что в одних точках пространства звучание громкое (звуковые волны усиливают друг друга), а в других — тихое (звуковые волны друг друга ослабляют).

Если свет обладает волновыми свойствами, то в результате наложения двух световых пучков может произойти не только усиление, но и ослабление света. А это значит, что совместное действие световых пучков может привести к возникновению темноты. Повседневный опыт показывает, что две лампы вместе дают больше света, чем каждая в отдельности. Однако при выполнении определённых условий (они будут обсуждаться в курсе физики старших классов) возможна обратная ситуация.

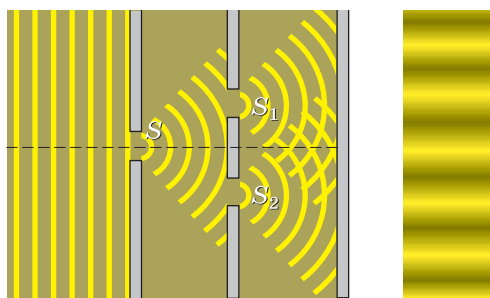


Рис. 162. Опыт Юнга

В 1802 г. английский учёный **Томас Юнг** (1773—1829) поставил опыт по сложению световых пучков, ставший доказательством того, что свет обладает волновыми свойствами. В опыте Юнга пучок света от ярко освещённой щели S направлялся на непрозрачный экран с двумя узкими параллельными прорезями S_1 и S_2 (рис. 162). При этом на уда-

лённом экране возникал ряд чередующихся светлых и тёмных полос. Когда одну из щелей S_1 или S_2 закрывали, тёмные полосы исчезали и на экране оставалась лишь светлая полоса. Если бы свет, падающий на щели S_1 и S_2 , представлял собой поток частиц, то в случае открытия обеих щелей на экране можно было бы увидеть только две светлые полосы, пространство между которыми оставалось бы почти неосвещённым. Юнг смог дать правильное толкование результатов опыта, объяснив возникновение чередующихся светлых и тёмных полос интерференцией света.

Измерив ширину интерференционных полос, Юнг впервые определил длины световых волн.

Оказалось, что свету разных цветов соответствуют разные интервалы длин волн. Самые большие значения длин волн у красного света: от $7,6 \cdot 10^{-7}$ м до $6,2 \cdot 10^{-7}$ м.

Поскольку частота колебаний в волне обратно пропорциональна длине волны, то красному цвету соответствуют наименьшие по срав-

нению с другими цветами частоты: $4,0 \cdot 10^{14}$ — $4,8 \cdot 10^{14}$ Гц.

Длины волн убывают (а частоты возрастают) в следующей последовательности: *красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый*. Из этого ряда следует, что фиолетовый свет — самый коротковолновый, его длины волн лежат в интервале $4,5 \cdot 10^{-7}$ — $3,8 \cdot 10^{-7}$ м, им соответствует интервал частот $6,7 \cdot 10^{14}$ — $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц.

Итак, полученные Юнгом световые интерференционные картины свидетельствовали о том, что свет обладает волновыми свойствами.

Повседневный опыт показывает, что в некоторых случаях механические волны способны огибать препятствия, встречающиеся на их пути. Так, волна от брошенного в пруд камня огибает торчащее из воды бревно, а сигнал машины за углом дома мы можем слышать, даже когда самой машины не видно.

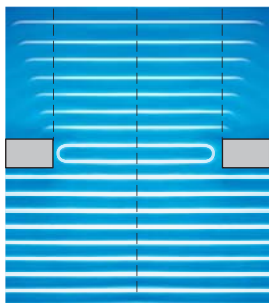


Рис. 163. Проходя через широкое отверстие, волны почти не испытывают отклонения от прямолинейного распространения

Явление огибания волнами препятствий называют дифракцией.

Получим на поверхности воды систему прямолинейных волн (для этого к стержню следует прикрепить плоскую насадку и расположить её параллельно поверхности воды) и ограничим их дальнейшее распространение отверстием, ширина которого существенно больше длины волны. Мы увидим, что отверстие пропускает волну, почти не изменяя её формы (рис. 163). Сузим ограничивающее отверстие до размера, меньшего длины волны. Область за отверстием окажется заполненной круговыми волнами, центром которых служит малое отверстие (рис. 164), — наблюдается дифракция.

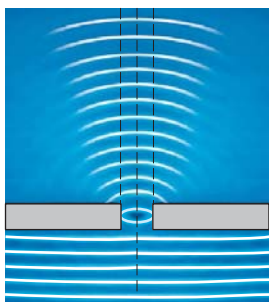


Рис. 164. Когда ширина отверстия становится сравнимой с длиной волны, наблюдается дифракция

Таким образом, наиболее отчётливо дифракция проявляется при встрече волны с препятствием (или отверстием), имеющим размеры, близкие к длине волны. Именно по этой причине трудно наблюдать явление «звуковой тени».

Длины звуковых волн обычно сравнимы с размерами препятствий, поэтому волны их огибают.

Наблюдается ли явление дифракции для света? Пучок света, выходящий в опыте Юнга из первичной щели *S*, расплывается, расходится «веером». Это и есть дифракция. Если мы посмотрим на фонарь или лампу сощурившись, то увидим вертикальную полосу света — результат дифракционной расходимости.

В 8 классе образование теней от непрозрачных предметов мы объясняли прямолинейным распространением света. Размеры большинства тел очень велики по сравнению с длинами световых волн, огибать такие тела световые волны не могут. В этих случаях можно сказать, что свет распространяется прямолинейно.

В 1818 г. французский физик **Огюстен Френель** (1788—1827) представил в Парижскую академию наук «Записку о теории дифракции», в которой дал объяснение многочисленным опытам по дифракции с волновой точки зрения. Рассматривая эту работу, известный французский учёный **Симеон Пуассон** (1781—1840) обратил внимание на то, что из теории Френеля следует «нелепый» вывод: в центре тени, отбрасываемой маленьким круглым диском, должно находиться светлое пятнышко.

Каково же было удивление учёных, когда французский физик **Доминик Араго** (1786—1853) экспериментально подтвердил, что такое пятнышко действительно существует! Опыт Араго стал одним из веских доказательств правильности волновой теории света.

В то же время по мере развития физики к концу XIX в. был открыт целый ряд экспериментальных фактов, которые можно было объяснить только на основе корпускулярных представлений о свете, т. е. рассматривая его как поток частиц.

Поэтому *в настоящее время признано справедливым как волновое, так и корпускулярное описание света. Свет в некоторых случа-*

ях ведёт себя как волна, а в некоторых как поток частиц.

Оба эти описания, дополняя друг друга, позволяют получить наиболее точное представление о поведении света.



1. Какие два взгляда на природу света существовали с давних пор среди учёных?
2. Какое явление называют интерференцией волн?
3. При каких условиях можно наблюдать интерференционную картину?
4. В чём заключалась суть опыта Юнга, что этот опыт доказывал и когда был поставлен?
5. Что можно сказать о частоте (или длине волны) световых волн разных цветов?
6. Что называют дифракцией?
7. При каких условиях дифракция проявляется наиболее отчётливо?
8. В каких опытах обнаруживается дифракция световых волн?



ЗАДАНИЕ



1. На полоске чёрного картона с помощью швейной иглы диаметром 0,6—0,8 мм сделайте отверстия всё уменьшающихся диаметров, начиная с диаметра иглы. Чтобы отверстия получились круглыми, полоску картона при прокалывании поворачивайте вокруг иглы. Посмотрите на точечный источник света (можно использовать фонарик мобильного телефона, проводя наблюдения на расстоянии 2—3 м от него) последовательно через каждое отверстие, помещая его перед глазом. Как изменяется наблюдаемая картина при уменьшении диаметра отверстия? С каким явлением это связано?



2. На полоске чёрного картона с помощью швейной иглы сделайте двойное отверстие (два маленьких отверстия, расположенных на расстоянии долей миллиметра друг от друга). Хорошо, если диаметры отверстий получатся около 0,2—0,3 мм, а расстояние между ними — 0,4—0,6 мм. Посмотрите через двойное отверстие на точечный источник света. Вы увидите, что центральное светлое пятно разбито тёмными полосами на ряд светлых полос. Объясните, с какими явлениями связана наблюдаемая картина.

§ 52

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА

В начале XIX в. опытным путём была подтверждена справедливость гипотезы о волновой природе света. В то время ни о каких волнах, кроме механических, учёные ещё не знали. Поэтому считали, что свет, подобно звуку, представляет собой механическую упругую волну.

Вы уже знаете, что упругие волны могут возникать только в веществе, поскольку именно

частицы вещества совершают упругие колебания, распространяющиеся в пространстве (вспомните опыт, доказывающий, что звук не распространяется в вакууме).

Значит, *если свет — упругая волна, то для его распространения нужна среда.*

Однако свет от звёзд доходит до нас через такие области космического пространства, где нет вещества. Учитывая этот факт, сторонники волновых воззрений на природу света выдвинули гипотезу о том, что всё мировое пространство заполнено некой невидимой упругой средой, которую они назвали *светоносным эфиром* (идея о существовании эфира была высказана ещё в XVI в.). Считалось, что именно в этом эфире и распространяется свет.

В то же время предположение о существовании светоносного эфира порождало много противоречий и вопросов. Так, например, в конце второго десятилетия XIX в. было выяснено, что свет является поперечной волной. Известно, что упругие поперечные волны возникают только в твёрдых телах. Получалось, что светоносный эфир представляет собой твёрдое тело.

В связи с этим возникал вопрос о том, как планеты и другие небесные тела могут двигаться сквозь твёрдый эфир, не испытывая при этом никакого сопротивления.

Во второй половине XIX в. Максвелл создал теорию электромагнитного поля, согласно которой электромагнитные волны, подобно световым, являются поперечными и распространяются в вакууме со скоростью света. Исходя из того что световые и электромагнитные волны обладают общими свойствами, Максвелл предположил, что *свет является частным проявлением электромагнитных волн.*

Дальнейшее развитие физики подтвердило это предположение. Стало ясно, что видимый свет — это только небольшой диапазон электромагнитных волн с длиной волны от $3,8 \cdot 10^{-7}$ до $7,6 \cdot 10^{-7}$ м или с частотами от $4,0 \cdot 10^{14}$ до $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц (см. рис. 155).



МАКС ПЛАНК

(1858—1947)

Немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Закон излучения Планка явился основой нового этапа развития физики

Тем не менее представление о том, что в некоторых случаях свет ведёт себя аналогично потоку частиц, не потеряло своей актуальности.

К началу XX в. выяснилось, что электродинамика Максвелла не позволяет объяснить некоторые экспериментальные факты. Противоречия между теорией и экспериментальными данными удалось разрешить, предположив, что свет, помимо волновых, обладает и корпускулярными свойствами. В 1900 г. немецкий физик **Макс Планк** выдвинул гипотезу, что атомы испускают электромагнитную энергию отдельными порциями — **квантами**. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — коэффициент пропорциональности, получивший название **постоянной Планка**.

В 1905 г. немецкий физик **Альберт Эйнштейн** (1879—1955) выдвинул идею, согласно которой электромагнитные волны с частотой ν можно рассматривать как поток квантов излучения с энергией $E = h\nu$.

В настоящее время квант электромагнитного излучения называют также **фотоном**. Фотон (от греч. *фотос* — свет) — это элементарная частица, являющаяся квантом электромагнитного излучения (в том числе света). Фотон не обладает ни массой, ни зарядом и всегда распространяется со скоростью света.

Таким образом, свет обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

С увеличением частоты электромагнитного излучения в большей степени проявляются его корпускулярные свойства, т. е. свойства, присущие потоку частиц, и в меньшей — волновые. Из всех диапазонов электромагнитных волн наиболее ярко выраженными корпускулярными свойствами обладает гамма-излуче-

$$E = h\nu$$

ние (см. рис. 155). Подробнее о гамма-квантах вы узнаете из следующей главы.



1. Каковы были представления учёных о природе света в начале XIX в.? **2.** Чем была вызвана необходимость выдвижения гипотезы о существовании светового эфира? **3.** Какое предположение о природе света было сделано Максвеллом? Какие общие свойства света и электромагнитных волн явились основанием для такого предположения? **4.** Как называется частица электромагнитного излучения?

§ 53

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА. ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

В курсе физики 8 класса вы познакомились с явлением преломления света. Теперь вы знаете, что свет представляет собой электромагнитные волны определённого диапазона частот. Опираясь на знания о природе света, вы сможете понять физическую причину преломления и объяснить многие другие связанные с ним световые явления.

Согласно *закону преломления света* (рис. 165):

лучи падающий, преломлённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред.

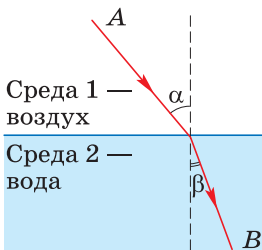


Рис. 165. Переходя из одной среды в другую, луч преломляется, т. е. меняет направление распространения

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}, \quad (1)$$

где n_{21} — *относительный показатель преломления* второй среды относительно первой.

Если луч переходит в какую-либо среду из вакуума, то

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad (2)$$

где n — *абсолютный показатель преломления* (или просто *показатель преломления*) второй среды. В этом случае первой средой является вакуум, абсолютный показатель преломления которого принят за единицу.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}$$

Закон преломления света был открыт опытным путём голландским учёным **Виллебрордом Снеллиусом** (1580—1626) в 1621 г. Закон был сформулирован в трактате по оптике, который нашли в бумагах учёного после его смерти.

После открытия Снеллиуса несколькими учёными была выдвинута гипотеза о том, что *преломление света обусловлено изменением его скорости при переходе через границу двух сред*. Справедливость этой гипотезы была подтверждена теоретическими доказательствами, выполненными независимо друг от друга в 1662 г. французским математиком **Пьером Ферма** (1601—1665) и в 1690 г. Х. Гюйгенсом. Разными путями они пришли к одному и тому же результату, доказав, что

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная отношению скоростей света в этих средах:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что если угол преломления β меньше угла падения α , то свет данной частоты во второй среде распространяется медленнее, чем в первой, т. е. $v_2 < v_1$. Это означает, что вторая среда является оптически более плотной, чем первая.

Взаимосвязь величин, входящих в уравнение (3), позволяет сформулировать определение относительного показателя преломления:

относительным показателем преломления второй среды относительно первой называют физическую величину, равную отношению скоростей света в этих средах:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (4)$$

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

Пусть луч света переходит из вакуума в какую-либо среду. Заменяя в уравнении (4) v_1 на скорость света в вакууме c , а v_2 на скорость света в среде v , получим уравнение (5), являющееся определением абсолютного показателя преломления:

абсолютным показателем преломления среды называют физическую величину, равную отношению скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (5)$$

$$n = \frac{c}{v}$$

Согласно уравнениям (4) и (5), n_{21} показывает, во сколько раз меняется скорость света при его переходе из одной среды в другую, а n — при переходе из вакуума в среду. В этом заключается *физический смысл показателей преломления*.

Опыт показывает, что значение абсолютного показателя преломления n любого вещества больше единицы. Тогда, согласно уравнению (5), $c/v > 1$ и $c > v$, т. е. *скорость света в любом веществе меньше скорости света в вакууме*.

Не приводя строгих обоснований (они сложны и громоздки), отметим, что причиной уменьшения скорости света при его переходе из вакуума в вещество является взаимодействие световой волны с атомами и молекулами вещества. *Чем более оптически плотная среда, в которой распространяется свет, тем сильнее это взаимодействие, тем меньше скорость света и тем больше показатель преломления*. Таким образом, **скорость света в среде, а значит, и абсолютный показатель преломления зависят от свойств этой среды**.

Например, показатели преломления различных сортов стекла лежат в пределах от 1,470 до 2,040, а показатель преломления воды равен 1,333. Значит, стекло — среда оптически более плотная, чем вода.

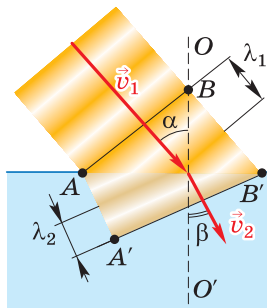


Рис. 166. При переходе световых волн из воздуха в воду скорость света уменьшается, фронт волны, а вместе с ним и её скорость меняют направление

Обратимся к рисунку 166, с помощью которого можно пояснить, почему на границе двух сред с изменением скорости меняется и направление распространения световой волны.

На рисунке изображена световая волна, переходящая из воздуха в воду и падающая на границу раздела этих сред под углом α . В воздухе свет распространяется со скоростью v_1 , а в воде — с меньшей скоростью v_2 .

При распространении волны она постепенно захватывает всё большую область пространства. Её от свободной от волнового процесса области отделяет граница, которую называют *фронтом волны*. То есть фронт волны — это множество точек пространства, которых достигла волна в данный момент времени. Фронт волны перпендикулярен её скорости.

Первой до границы доходит точка A волны. В этот момент фронтом волны будет поверхность AB . За промежуток времени Δt точка B , перемещаясь в воздухе с прежней скоростью v_1 , достигнет точки B' на поверхности воды. За то же время точка A , перемещаясь в воде с меньшей скоростью v_2 , пройдёт меньшее расстояние, достигнув только точки A' . При этом фронт волны $A'B'$ в воде окажется повёрнутым на некоторый угол по отношению к фронту волны AB в воздухе. А вектор скорости поворачивается, приближаясь к прямой OO' , перпендикулярной к границе раздела сред. При этом угол преломления β оказывается меньше угла падения α . Так происходит преломление света.

Опыт показывает, что при переходе в другую среду и повороте фронта волны меняется и длина волны: при переходе в оптически более плотную среду уменьшается и скорость, и длина волны ($\lambda_2 < \lambda_1$). Это согласуется и с известной вам формулой $\lambda = v/\nu$, из которой следует, что при неизменной частоте ν уменьшение скорости распространения волны сопровождается пропорциональным уменьшением длины волны.





1. Какое из двух веществ является оптически более плотным?
2. Как определяются показатели преломления через скорость света в средах?
3. Где свет распространяется с наибольшей скоростью?
4. Какова физическая причина уменьшения скорости света при его переходе из вакуума в среду или из среды с меньшей оптической плотностью в среду с большей?
5. Чем определяются (т. е. от чего зависят) абсолютный показатель преломления среды и скорость света в ней?
- 6*. Расскажите, что иллюстрирует рисунок 166.



УПРАЖНЕНИЕ 48

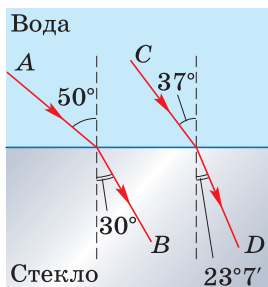


Рис. 167

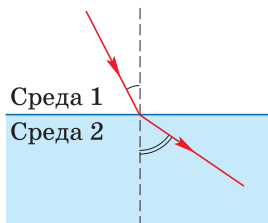


Рис. 168

1. Какие из трёх величин — длина волны, частота и скорость распространения волны — изменятся при переходе волны из вакуума в алмаз?
2. Используя рисунок 167, докажите, что относительный показатель преломления n_{21} для данных двух сред не зависит от угла падения луча света.
3. Какая из двух сред (рис. 168) обладает большей оптической плотностью? В какой из них луч света распространяется с большей скоростью? Ответ обоснуйте.
- 4*. Используя уравнения (4) и (5), докажите, что $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, где n_1 — абсолютный показатель преломления первой среды, а n_2 — второй.

Указание: выразите из уравнения (5) скорость v света в среде через c и n ; по аналогии с полученной формулой запишите формулы для определения скоростей v_1 и v_2 , входящих в уравнение (4); замените в уравнении (4) v_1 и v_2 на соответствующие им буквенные выражения и упростите полученную формулу.

§ 54

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. ЦВЕТА ТЕЛ

Вы уже знаете, что абсолютный показатель преломления среды зависит от её свойств.

Являются ли свойства среды единственным фактором, определяющим показатель преломления, или существуют какие-либо другие причины, от которых он зависит?

Для ответа на этот вопрос сделаем опыт, изображённый на рисунке 169. Разместим око-

ло объектива осветителя O диафрагму D с горизонтальной щелью (расположенной перпендикулярно плоскости чертежа) и синий светофильтр Φ (т. е. синее стекло). На экране напротив щели диафрагмы получится её изображение C_1 синего цвета (рис. 169, a).

Заменим синий фильтр на красный — и на том же месте вместо синего изображения щели увидим красное K_1 .

Теперь на пути красного светового пучка поставим треугольную стеклянную призму NEM (рис. 169, b ; объёмное изображение призмы — на рис. 169, $г$). Проходя через призму, луч отклоняется в сторону более широкой её части NM , в результате чего изображение щели смещается вниз в положение K_2 .

Проделаем тот же опыт, предварительно заменив красный светофильтр на синий (рис. 169, $в$). Мы обнаружим, что изображение щели C_2 , полученное в синих лучах, окажется смещённым в том же направлении, что и красное, но на большее расстояние.

Проведённый опыт свидетельствует о том, что лучи синего цвета, имеющие бóльшую час-

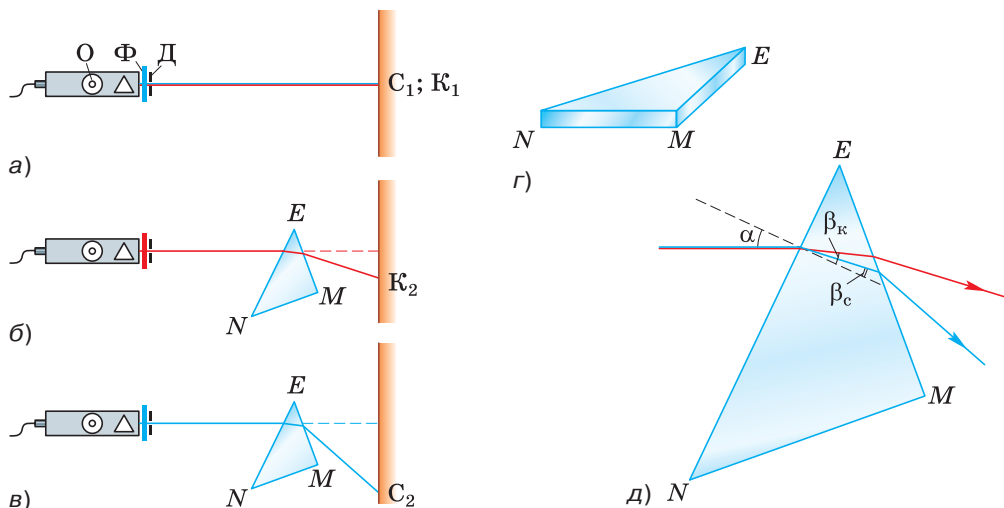


Рис. 169. Наблюдение дисперсии света при преломлении в призме световых лучей разной частоты

тоту, чем красные, преломились сильнее красных. Это означает, что *абсолютный показатель преломления стекла, из которого изготовлена призма, зависит не только от свойств стекла, но и от частоты (от цвета) проходящего через него света.*

Преломление красных и синих лучей в призме показано на рисунке 169, д. На грани *NE* призмы при одном и том же угле падения α синий луч преломился сильнее красного: $\beta_c < \beta_k$, значит, $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_c} > \frac{\sin \alpha}{\sin \beta_k}$, т. е.

$$n_c > n_k.$$

Следовательно, так как *для синих лучей показатель преломления стекла больше, чем для красных, то скорость их распространения в стекле меньше скорости красных, поскольку скорость обратно пропорциональна показателю преломления: $v = \frac{c}{n}$.*

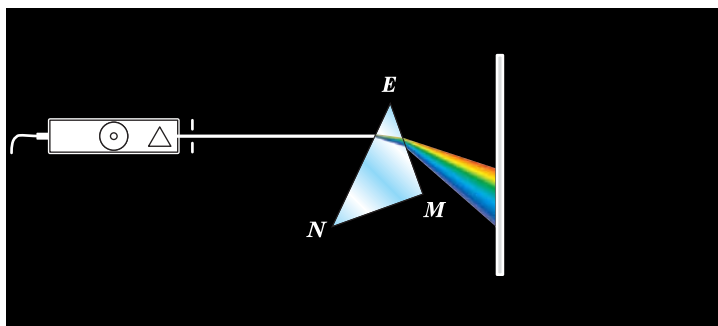
Зависимость показателя преломления вещества и скорости света в нём от частоты световой волны называют дисперсией света.

Слово «дисперсия» происходит от латинского *dispersio* и означает «рассеяние, развеивание».

Теперь, убрав с осветителя фильтр, пропустим через призму пучок белого света (рис. 170). Мы увидим, что этот пучок не только отклонился к более широкой части призмы, но и разложился в радужную полоску, которую называют **спектром**¹. В нём семь цветов — красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый (как в радуге) — плавно переходят друг в друга.

¹ Термин «спектр» (от лат. *spectrum* — образ) был введён И. Ньютоном для обозначения радужной полосы, получающейся при прохождении пучка солнечного света через треугольную стеклянную призму.

Рис. 170. Разложение пучка белого света в спектр



Это наводит на мысль, что белый свет является сложным, состоящим из световых волн разных цветов (и соответственно разных частот).

Синий и красный лучи, выделенные в предыдущем опыте из белого света с помощью фильтров, при прохождении через призму не разлагались в спектр. Такие цветные лучи являются *простыми*, или, как их ещё называют, *монохроматическими* (от греч. *монос* — один, единственный и *хроматикос* — цветной, окрашенный). Свет каждого цвета представлен волнами настолько узкого интервала частот, что обычно его характеризуют одной определённой частотой.

Чтобы удостовериться, что призма не окрашивает, а именно разлагает белый свет, поставим на пути вышедшего из призмы и разложившегося в спектр пучка собирающую линзу (рис. 171). Мы увидим, что после преломления

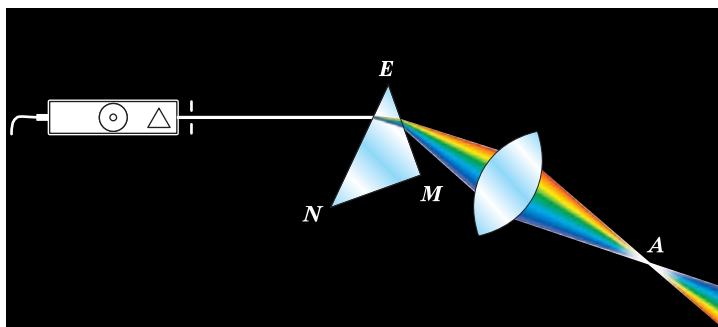


Рис. 171. Сложение спектральных цветов с помощью линзы

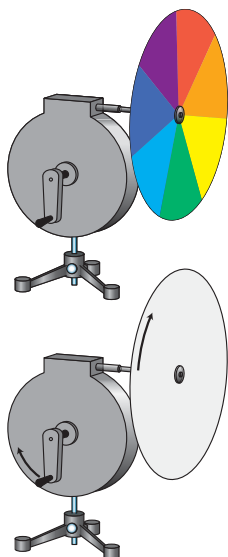


Рис. 172. Опыт по сложению спектральных цветов

в линзе разноцветные лучи, пересекаясь в точке А, «складываются», приобретая белый цвет.

Сложить спектральные цвета и получить белый цвет можно и на более простом опыте. Возьмём картонный диск с изображёнными на нём разноцветными секторами и укрепим его на валу центробежной машины (рис. 172). При быстром вращении диска создаётся впечатление, что он белый.

Зададимся вопросом, почему окружающие нас тела, освещённые одним и тем же солнечным светом, имеют разные цвета. В чём заключается физическая причина такого различия?

Чтобы выяснить это, сделаем опыт, схема которого изображена на рисунке 173. Получим на белом экране спектр, изображённый на рисунке 174, а. Закроем правую часть спектра широкой бумажной полоской, например зелёного цвета. Мы увидим, что цвет полоски остаётся ярко-зелёным и не меняет оттенка только в той области, где на неё падают зелёные лучи. А при освещении лучами других цветов она либо меняет оттенок (в жёлтой части спектра), либо выглядит тёмной (рис. 174, б).

Значит, покрывающая полоску краска обладает способностью отражать только зелёный свет и поглощать свет всех остальных цветов.

Мы повторили с вами опыты, которые проделал Ньютон в 1666 г. Он пропускал через призму узкий пучок солнечного света, проходящего через маленькое отверстие в ставне.

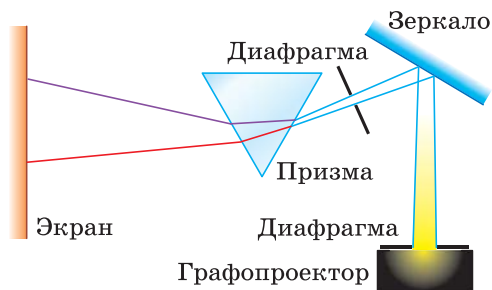


Рис. 173. Схема опыта для получения сплошного спектра

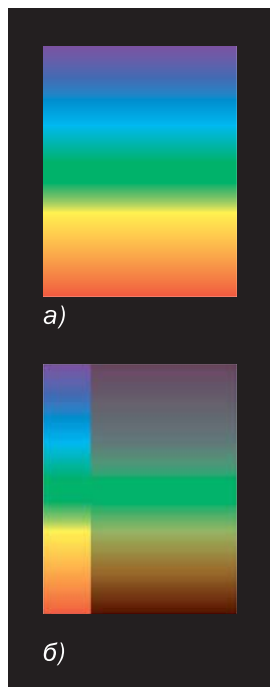


Рис. 174. Сплошной (непрерывный) спектр

В настоящее время для получения чётких и ярких спектров используют специальные оптические приборы.

На рисунке 175 показано устройство и внешний вид одного из таких приборов — двухтрубного спектроסקопа.

Рассмотрим принцип действия спектроסקопа. В трубе К (рис. 175, а), называемой *коллиматором*, имеется узкая щель *S*. Через эту щель исследуемый свет входит в прибор и расширяющимся пучком падает на линзу \mathcal{L}_1 . Щель *S* расположена в фокальной плоскости линзы, поэтому свет выходит из линзы параллельным пучком, а затем падает на призму П.

Так как волны разных цветов (т. е. разных частот) отклоняются призмой на разные углы, то параллельные пучки разных цветов выходят из призмы в разных направлениях (на рисунке показаны крайние лучи только двух пучков — красного и фиолетового). Эти пучки, преломившись в линзе \mathcal{L}_2 , образуют в её фокальной плоскости $\mathcal{E}\mathcal{E}_1$ изображения щели *S*. Причём изображения, соответствующие волнам разных частот, приходятся на разные места плоскости $\mathcal{E}\mathcal{E}_1$.

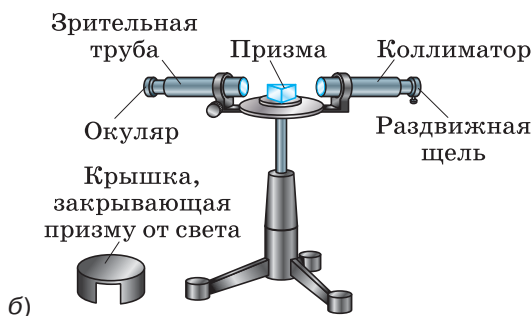
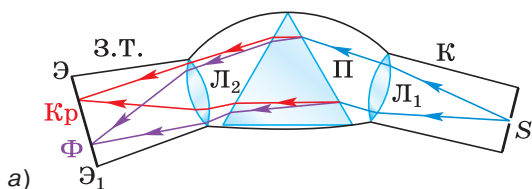


Рис. 175. Схема устройства и внешний вид двухтрубного спектроסקопа

Если на щель падает белый свет, то все изображения щели сливаются в цветную полосу, в которой представлены все цвета.

Если же исследуемый свет представляет собой смесь нескольких монохроматических (простых) цветов, то спектр получится в виде узких линий соответствующих цветов, разделённых тёмными промежутками.

В спектроскопе в плоскости $\mathcal{E}\mathcal{E}_1$ находится матовое стекло, чтобы образующийся на нём спектр можно было наблюдать глазом, увеличив изображение с помощью линзы. Если же в плоскости $\mathcal{E}\mathcal{E}_1$ помещается фотопластинка, на которой получается фотография спектра, то прибор называют *спектрографом*.

На рисунке 176 показан однотрубный спектроскоп (внешний вид — рис. а; устройство — рис. б и в). В школе его обычно используют при выполнении лабораторных работ по оптике. В том, как он действует, вы разберётесь вместе с учителем при обсуждении вопросов после параграфа.

Спектроскоп был сконструирован в 1815 г. немецким физиком **Йозефом Фраунгофером** (1787—1826). Этот прибор был необходим учёному для исследования явления дисперсии, которым он занимался в то время.

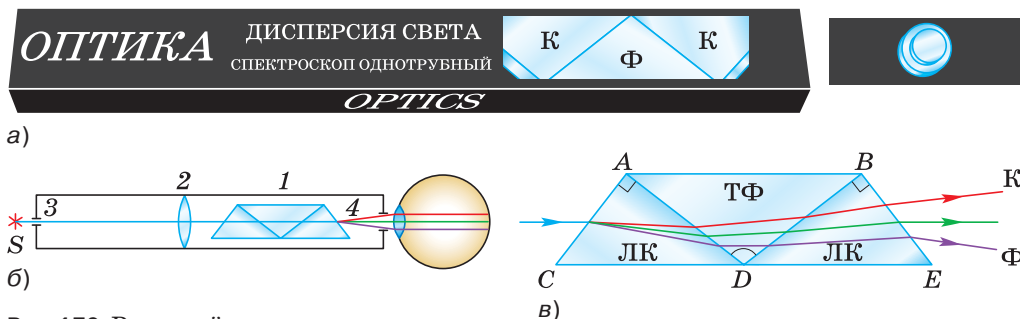


Рис. 176. Внешний вид и схема устройства однотрубного спектроскопа, применяемого при выполнении школьных лабораторных работ по оптике

ЛК — стекло «лёгкий крон»
ТФ — стекло «тяжёлый флинт»
Для лучей любого цвета $n_{\text{ТФ}} > n_{\text{ЛК}}$



1. Что называют дисперсией света? 2. Расскажите об опыте по преломлению белого света в призме. (Ход опыта, результаты, вывод.) 3. Расскажите об опыте, изображённом на рисунке 172. 4. В чём заключается физическая причина различия цветов окружающих нас тел? 5. Используя рисунок 175, расскажите об устройстве спектрографа. 6. Что такое спектрограмма? 7. Чем спектрограф отличается от спектроскопа?



Рассмотрите рисунок 176, *в* и объясните, почему при входе в призму ADB лучи отклоняются в сторону более широкой её части (угол преломления меньше угла падения), а при входе в призму DBE — в сторону более узкой её части (угол преломления больше угла падения).



УПРАЖНЕНИЕ 49

1. На столе в тёмной комнате лежат два листа бумаги — белый и чёрный. В центре каждого листа наклеен оранжевый круг. Что вы увидите, осветив эти листы белым светом; оранжевым светом такого же оттенка, как и круг?
2. На белом фоне написан текст синими буквами. Через стекло какого цвета нельзя увидеть надпись?



ЗАДАНИЕ



- Напишите на белом листе бумаги первые буквы названий всех цветов спектра фломастерами соответствующих цветов: К — красным, О — оранжевым, Ж — жёлтым и т. д. Рассмотрите буквы через трёхсантиметровый слой ярко окрашенной прозрачной жидкости, налитой в тонкостенный стакан. Запишите результаты наблюдений и объясните их.

Указание: в качестве указанной жидкости можно использовать, например, малиновый или лимонный сироп, различные соки и т. п.

§ 55

ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Вам уже известно, что при пропускании солнечного света через призму получается спектр в виде сплошной полосы. В ней представлены все цвета (т. е. волны всех частот от $4,0 \cdot 10^{14}$ до $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц), плавно переходящие один в другой. Такой спектр называют **сплошным** или **непрерывным** (см. рис. 174, *а*).

Сплошной спектр характерен для твёрдых и жидких излучающих тел, имеющих температуру порядка нескольких тысяч градусов

Цельсия. Сплошной спектр дают также светящиеся газы и пары, если они находятся под высоким давлением (т. е. если силы взаимодействия между их молекулами достаточно велики).

Например, сплошной спектр можно увидеть, если направить спектроскоп на свет от раскалённой нити электрической лампы ($t_{\text{нити}} \approx 2300^\circ\text{C}$), пламя свечи.

Иной вид имеет спектр, наблюдающийся у газов малой плотности. Такие газы обычно состоят из **изолированных** атомов, т. е. атомов, взаимодействие между которыми пренебрежимо мало. Свечения газа можно добиться нагреванием.

Например, если внести в пламя спиртовки кусочек поваренной соли (рис. 177), то пламя окрасится в жёлтый цвет, а в спектре, наблюдаемом с помощью спектроскопа, будут видны две близко расположенные жёлтые линии, характерные для спектра паров натрия (рис. 178, а).

Это означает, что под действием высокой температуры молекулы NaCl распались на атомы натрия и хлора. Свечение атомов хлора возбудить гораздо труднее, чем атомов натрия, поэтому в данном опыте линии хлора не видны. Другие химические элементы дают другие наборы отдельных линий определённых длин волн (рис. 178, б и в).

Такие спектры называют **линейчатыми**. Линейчатые спектры получают от газов и паров малой плотности, при которой свет излучается изолированными атомами.

Описанные спектры — сплошные и линейчатые — называют **спектрами испускания**.

Кроме спектров испускания существуют так называемые **спектры поглощения**. Из всех спектров поглощения будем рассматривать только линейчатые.

Линейчатые спектры поглощения дают газы малой плотности, состоящие из изолированных атомов, когда сквозь них проходит свет от яркого и более горячего (по сравнению с температурой самих газов) источника, дающего непрерывный спектр.

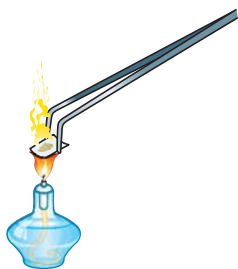


Рис. 177. При внесении в пламя спиртовки кусочка поваренной соли пламя окрасится в жёлтый цвет

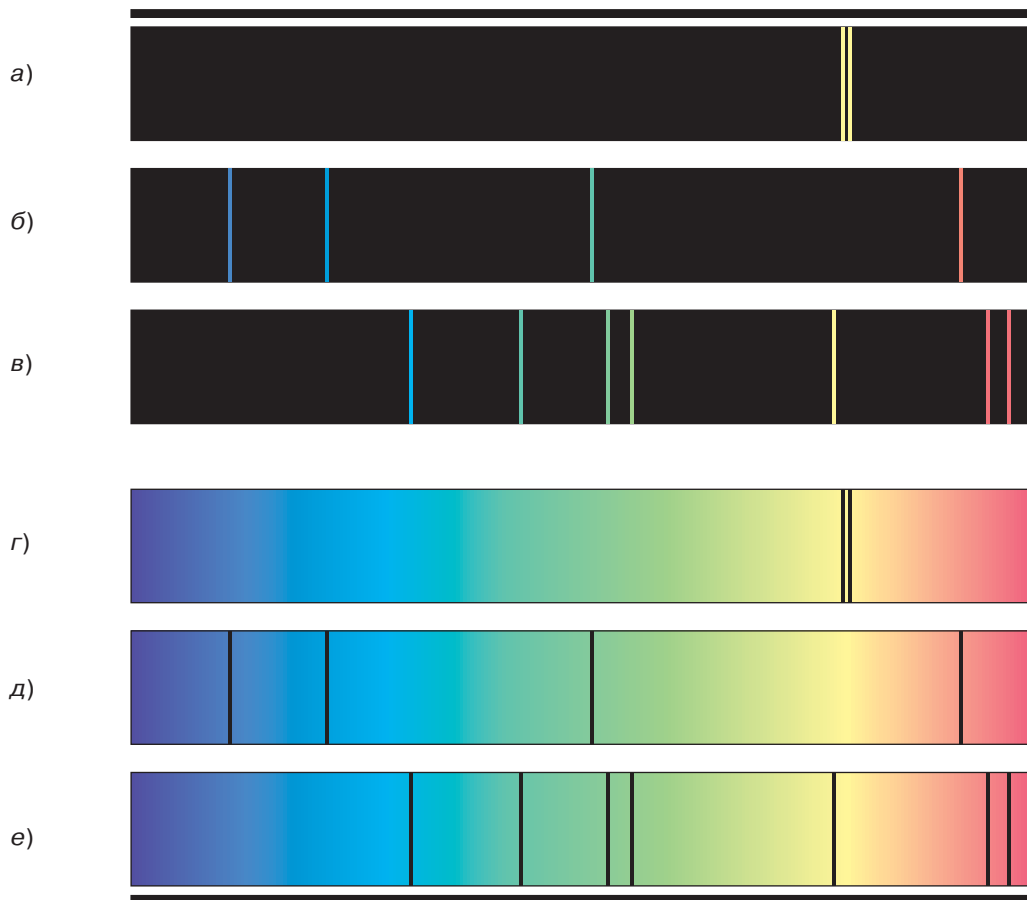
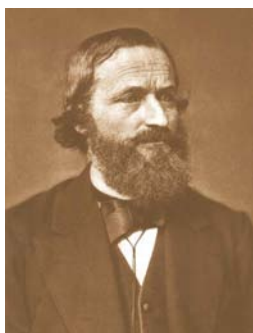


Рис. 178. Спектры испускания: *а* — натрия; *б* — водорода; *в* — гелия. Спектры поглощения: *г* — натрия; *д* — водорода; *е* — гелия

Линейчатый спектр поглощения можно получить, например, если пропустить свет от лампы накаливания через сосуд с парами натрия, температура которых ниже температуры нити лампы накаливания. В этом случае в сплошном спектре света от лампы появится узкая чёрная линия как раз в том месте, где располагается жёлтая линия в спектре испускания натрия (сравните рис. 178, *а* и *г*). Это и будет линейчатый спектр поглощения натрия. Другими словами, линии поглощения



Рис. 179. Идентификация по уникальным особенностям объекта



ГУСТАВ КИРХГОФ

(1824—1887)

Немецкий физик. Разработал метод спектрального анализа и открыл элементы — цезий и рубидий, установил закон теплового излучения

атомов натрия точно соответствуют его линиям испускания.

Совпадение частот линий испускания и поглощения можно наблюдать и в спектрах других элементов, например водорода и гелия (рис. 178, б, д и в, е).

Общий для всех химических элементов закон, согласно которому

атомы данного элемента поглощают световые волны тех же самых частот, на которых они излучают,

был открыт в середине XIX в. немецким физиком **Густавом Кирхгофом**.

Спектр атомов каждого химического элемента уникален. Как не бывает двух людей с одинаковым дактилоскопическим узором¹ или двух китов с одинаковой окраской хвостового плавника, так не существует и двух химических элементов, атомы которых излучали бы одинаковый набор спектральных линий (рис. 179).

Благодаря этому стало возможным появление *метода спектрального анализа*, разработанного в 1859 г. Кирхгофом и его соотечественником, немецким химиком Р. Бунзеном.

Спектральным анализом называют метод определения химического состава вещества по его спектру.

Для проведения спектрального анализа по линейчатым спектрам (атомный спектральный анализ) исследуемое вещество приводят в состояние атомарного газа (атомизируют) и одновременно с этим возбуждают атомы, т. е. сообщают им дополнительную энергию.

¹ Расположение рельефных линий кожи на внутренних (ладонных) поверхностях ногтевых фаланг пальцев рук.

Для атомизации и возбуждения обычно используют пламя или электрические разряды. В них помещают образец исследуемого вещества в виде порошка или аэрозоля раствора (т. е. мельчайших капелек раствора, распылённого в воздухе). Затем с помощью спектрографа получают фотографию спектров атомов элементов, входящих в состав данного вещества.

В настоящее время существуют таблицы спектров всех химических элементов. Отыскав в таблице такие же спектры, какие были получены от исследуемого образца, узнают, какие химические элементы входят в его состав. Путём сравнения интенсивности линий определяют количество каждого элемента в образце.

Спектральный анализ отличается от химического анализа своей простотой, высокой чувствительностью (например, с его помощью можно обнаружить наличие химического элемента, масса которого в данном образце не превышает 10^{-10} г), а также возможностью определять химический состав тел, например звёзд, дистанционно.

Он используется для контроля состава вещества в металлургии, машиностроении и атомной промышленности. Этот метод применяется также в геологии, археологии, криминалистике и многих других сферах деятельности. В астрономии методом спектрального анализа определяют химический состав атмосфер планет и звёзд, температуру звёзд и магнитную индукцию их полей. По смещению спектральных линий в спектрах галактик была определена их скорость, и на основании этого сделан вывод о расширении нашей Вселенной.



1. Как выглядит сплошной спектр? Какие тела дают сплошной спектр? Приведите примеры.
2. Как выглядят линейчатые спектры? От каких источников света получаются линейчатые спектры?
3. Каким образом можно получить линейчатый спектр испускания натрия?
4. Опишите механизм получения линейчатых спектров поглощения.
5. В чём заключается суть закона Кирхгофа, касающегося линейчатых спектров испускания и поглощения?
- 6*. Что такое спектральный анализ и как он проводится?
- 7*. Расскажите о применении спектрального анализа.



В 1885 г. швейцарский математик и физик И. Бальмер, анализируя линии атомного спектра водорода, лежащие в видимом диапазоне (см. рис. 178, б, д), заметил, что их длины волн можно выразить следующим образом: $\lambda_{\alpha} = \frac{9k}{5}$, $\lambda_{\beta} = \frac{4k}{3}$, $\lambda_{\gamma} = \frac{25k}{21}$, $\lambda_{\delta} = \frac{9k}{8}$, где k — не-
которая постоянная. Бальмеру удалось записать одну общую формулу для этих четырёх длин волн и предсказать с её помощью существование других линий в спектре водорода. Попробуйте найти эту формулу.

ИТОГИ ГЛАВЫ

ОБСУДИМ? Иван и Арсений поспорили, кто из них сможет пройти под радугой, которая появилась сразу после шумной летней грозы. Арсений утверждал, что если идти вперёд к радуге, то через некоторое время она окажется прямо у тебя над головой. Иван же утверждал, что при перемещениях наблюдателя радуга сама перемещается и наблюдатель никогда не увидит радугу над головой. Кто из ребят прав? Приведите схематический чертёж, на котором изображены наблюдатель, солнце, радуга и линия горизонта.

Иван, глядя на радугу, высказал предположение, что капли дождя висят в воздухе, ведь радуга неподвижна. Арсений же утверждал, что принципы наблюдения радуги и наблюдения изображения в кино идентичны.

Прав ли Иван и что пытался доказать Арсений?

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Развитие средств и способов передачи информации на далёкие расстояния с давних времён и до наших дней. Принцип действия сотовой связи» (возможная форма: презентация, реферат, макет).
2. «Метод спектрального анализа и его применение в науке и технике» (возможная форма: презентация, опыт, реферат).

СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

§ 56

РАДИОАКТИВНОСТЬ. МОДЕЛИ АТОМОВ

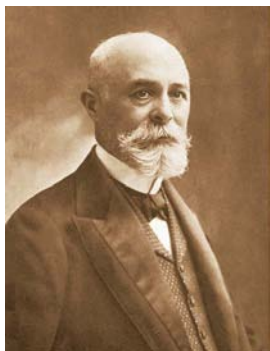
Предположение о том, что все тела состоят из мельчайших частиц, было высказано древнегреческими философами *Левкиппом* и *Демокритом* примерно 2500 лет назад. Частицы эти были названы *атомами*, что означает «неделимые». Они считали, что атом — это мельчайшая, простейшая, не имеющая составных частей и поэтому неделимая частица.

Но примерно с середины XIX в. стали появляться экспериментальные факты, которые ставили под сомнение представления о неделимости атомов. Результаты этих экспериментов наводили на мысль о том, что атомы имеют сложную структуру и что в их состав входят электрически заряженные частицы.

Наиболее ярким свидетельством сложного строения атома явилось открытие явления радиоактивности, сделанное французским физиком *Анри Беккерелем* в 1896 г.

Беккерель обнаружил, что химический элемент уран самопроизвольно (т. е. без внешних воздействий) излучает ранее неизвестные невидимые лучи, которые позже были названы *радиоактивным излучением*.

Поскольку радиоактивное излучение обладало необычными свойствами, многие учёные занялись его исследованием. Оказалось, что не только уран, но и некоторые другие химические элементы (например, ра-



АНРИ БЕККЕРЕЛЬ

(1852—1908)

Французский физик.
Один из первооткрывателей
радиоактивности



ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД

(1871—1935)

Английский физик. Обнаружил сложный состав радиоактивного излучения радия, предложил ядерную модель строения атома. Открыл протон

дий) тоже самопроизвольно испускают радиоактивные лучи. Способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению назвали **радиоактивностью** (от лат. *radio* — излучаю и *activus* — действенный).

В 1899 г. в результате опыта, проведённого под руководством английского физика **Эрнеста Резерфорда**, было обнаружено, что радиоактивное излучение радия неоднородно, т. е. имеет сложный состав. Рассмотрим, как проводился этот опыт.

На рисунке 180, *а* изображён толстостенный свинцовый сосуд с крупницей радия на дне. Пучок радиоактивного излучения радия выходит сквозь узкое отверстие и попадает на фотопластинку (излучение радия происходит во все стороны, но сквозь толстый слой свинца оно пройти не может).

После проявления фотопластинки на ней обнаруживалось одно тёмное пятно — как раз в том месте, куда попадал пучок.

Потом опыт изменяли (рис. 180, *б*): создавали сильное магнитное поле, действовавшее на пучок. В этом случае на проявленной пластинке возникало три пятна: одно, центральное, было на том же месте, что и раньше, а два других — по разные стороны от центрального. Если два потока отклонились в магнитном поле от прежнего направления, значит, они представляют собой потоки заряженных частиц. Отклонение в разные стороны свидетельствовало о разных знаках электрических зарядов частиц. В одном потоке присутствовали только положительно заряженные частицы, в другом — отрицательно заряженные. А центральный поток представлял собой излучение, не имеющее электрического заряда.

Положительно заряженные частицы называли **альфа-частицами**, отрицательно заряженные — **бета-частицами**, а нейтральные — **гамма-частицами** (гамма-квантами).

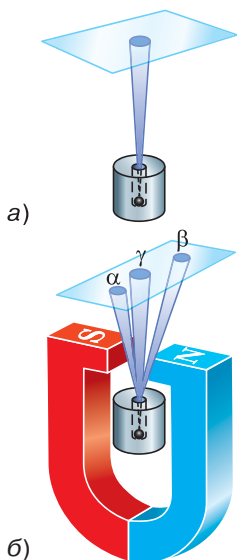


Рис. 180. Схема опыта Резерфорда по определению состава радиоактивного излучения

Некоторое время спустя в результате исследования различных физических характеристик и свойств этих частиц (электрического заряда, массы и др.) удалось установить, что *β -частица представляет собой электрон, а α -частица — полностью ионизированный атом химического элемента гелия* (т. е. атом гелия, потерявший оба электрона). Выяснилось также, что *γ -излучение представляет собой один из видов, точнее диапазонов, электромагнитного излучения* (см. рис. 155).

Явление радиоактивности, т. е. самопроизвольное излучение веществом α -, β - и γ -частиц, наряду с другими экспериментальными фактами, послужило основанием для предположения о том, что атомы вещества имеют сложный состав. Поскольку было известно, что атом в целом нейтрален, это явление позволило сделать предположение, что в состав атома входят отрицательно и положительно заряженные частицы.

Опираясь на эти и некоторые другие факты, английский физик **Джозеф Джон Томсон** предложил в 1903 г. одну из первых моделей строения атома. По предположению Томсона, атом представляет собой шар, по всему объёму которого равномерно распределён положительный заряд. Внутри этого шара находятся электроны. Каждый электрон может совершать колебательные движения около своего положения равновесия. Положительный заряд шара равен по модулю суммарному отрицательному заряду электронов, поэтому электрический заряд атома в целом равен нулю.

Модель строения атома, предложенная Томсоном, нуждалась в экспериментальной проверке. В частности, важно было проверить, действительно ли положительный заряд распределён по всему объёму атома с постоянной плотностью. Поэтому в



ДЖОЗЕФ ДЖОН ТОМСОН

(1856—1940)

Английский физик. Открыл электрон. Предложил одну из первых моделей строения атома

1911 г. Резерфорд совместно со своими сотрудниками провёл ряд опытов по исследованию состава и строения атомов.

Чтобы понять, как проводились эти опыты, рассмотрим рисунок 181. В опытах использовался свинцовый сосуд С с радиоактивным веществом Р, излучающим α -частицы. Из этого сосуда α -частицы вылетают через узкий канал со скоростью порядка 15 000 км/с.

Поскольку α -частицы непосредственно увидеть невозможно, то для их обнаружения служит стеклянный экран Э. Экран покрыт тонким слоем специального вещества, благодаря чему в местах попадания в экран α -частиц возникают вспышки, которые наблюдаются с помощью микроскопа М. Такой метод регистрации частиц называется **методом сцинтилляций** (т. е. вспышек).

Вся эта установка помещается в сосуд, из которого откачан воздух (чтобы устранить рассеяние α -частиц за счёт их столкновений с молекулами воздуха).

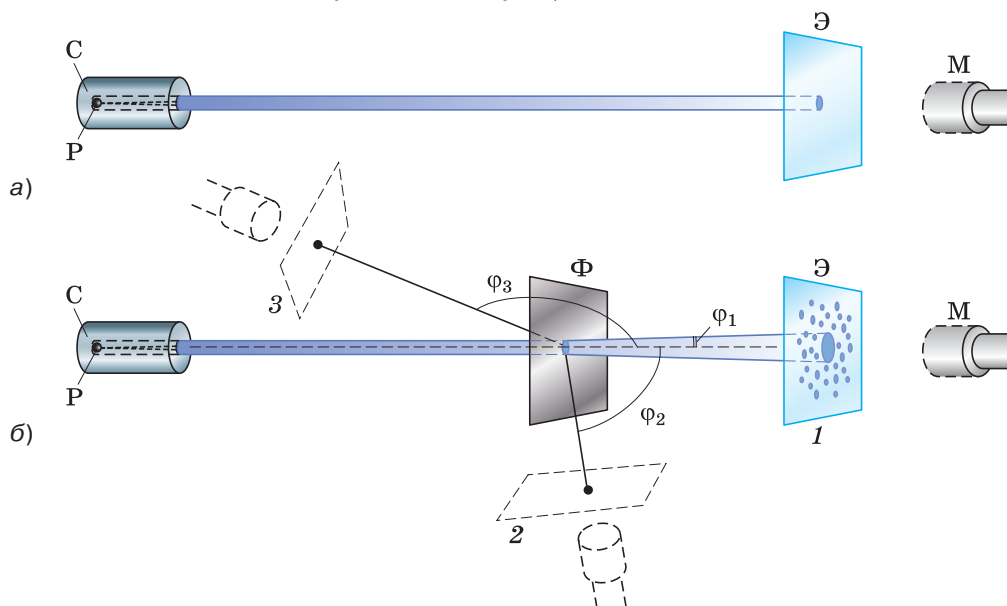


Рис. 181. Схема установки опыта Резерфорда по исследованию строения атома

Если на пути α -частиц нет никаких препятствий, то они падают на экран узким, слегка расширяющимся пучком (рис. 181, а). При этом все возникающие на экране вспышки сливаются в одно небольшое световое пятно.

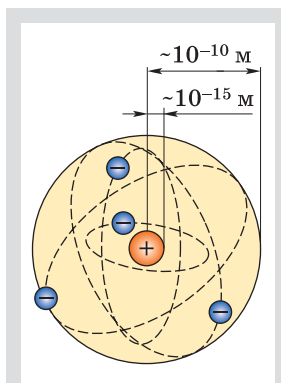
Если же на пути α -частиц поместить тонкую фольгу Φ из исследуемого металла (рис. 181, б), то при взаимодействии с веществом α -частицы рассеиваются по всем направлениям на разные углы φ (на рисунке изображены только три угла: φ_1 , φ_2 и φ_3).

Когда экран находится в положении 1, наибольшее количество вспышек расположено в центре экрана. Значит, основная часть всех α -частиц прошла сквозь фольгу, почти не изменив первоначального направления (рассеялась на малые углы). При удалении от центра экрана количество вспышек становится меньше. Следовательно, с увеличением угла рассеяния φ количество рассеянных на эти углы частиц резко уменьшается.

Перемещая экран вместе с микроскопом вокруг фольги, можно обнаружить, что некоторое (очень небольшое) число частиц рассеялось на углы, близкие к 90° (это положение экрана обозначено цифрой 2), а некоторые единичные частицы — на углы порядка 180° , т. е. в результате взаимодействия с фольгой были отброшены назад (положение 3).

Именно эти случаи рассеяния α -частиц на большие углы дали Резерфорду наиболее важную информацию для понимания того, как устроены атомы веществ. Проанализировав результаты опытов, Резерфорд пришёл к выводу, что **столь сильное отклонение α -частиц возможно только в том случае, если внутри атома имеется чрезвычайно сильное электрическое поле. Такое поле могло быть создано зарядом, сконцентрированным в очень малом объёме (по сравнению с объёмом атома).**

Поскольку масса электрона примерно в 8000 раз меньше массы α -частицы, электроны,



Один из примеров схематического изображения ядерной модели атома, предложенной Э. Резерфордом

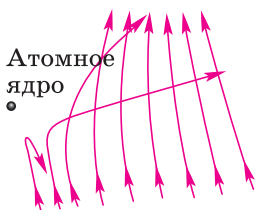


Рис. 182. Траектории полёта α -частиц при прохождении сквозь атомы вещества

входящие в состав атома, не могли существенным образом изменить направление движения α -частиц. Поэтому в данном случае речь может идти только о силах электрического отталкивания между α -частицами и положительно заряженной частью атома, масса которой значительно больше массы α -частицы.

Эти соображения привели Резерфорда к созданию ядерной (планетарной) модели атома (о которой вы уже имеете представление из курса физики 8 класса). Напомним, что, согласно этой модели, в центре атома находится положительно заряженное ядро, занимающее очень малый объём атома. Вокруг ядра движутся электроны, масса которых значительно меньше массы ядра. Атом электрически нейтрален, поскольку заряд ядра равен модулю суммарного заряда электронов.

Резерфорд сумел оценить размеры атомных ядер. Оказалось, что в зависимости от массы атома его ядро имеет диаметр порядка 10^{-14} — 10^{-15} м, т. е. оно в десятки и даже сотни тысяч раз меньше атома (диаметр атома около 10^{-10} м).

На рисунке 182 показано, как меняется траектория полёта α -частиц в зависимости от того, на каком расстоянии от ядра атома они пролетают. Напряжённость создаваемого ядром электрического поля, а значит, и сила действия на α -частицу довольно быстро убывают с увеличением расстояния от ядра. Поэтому направление полёта частицы сильно меняется только в том случае, если она проходит очень близко к ядру.

Поскольку диаметр ядра значительно меньше диаметра атома, то большая часть α -частиц проходит сквозь атом на таких расстояниях от ядра, где сила отталкивания создаваемого им поля слишком мала, чтобы существенно изменить направление движения α -частиц. И только очень немногие частицы пролетают рядом с ядром, т. е. в области сильного поля, и отклоняются на большие углы. Именно такие результаты и были получены в опыте Резерфорда.

Таким образом, в результате опытов по рассеянию α -частиц была доказана несостоятельность модели атома Томсона, выдвинута ядерная модель строения атома и проведена оценка диаметров атомных ядер.



1. В чём заключалось открытие, сделанное Беккерелем в 1896 г.?
2. Расскажите, как проводился опыт, схема которого изображена на рисунке 180. Что выяснилось в результате этого опыта?
3. О чём свидетельствовало явление радиоактивности?
4. Что представлял собой атом согласно модели, предложенной Томсоном?
5. Используя рисунок 181, расскажите, как проводился опыт по рассеянию α -частиц.
6. Какой вывод был сделан Резерфордом на основании того, что некоторые α -частицы при взаимодействии с фольгой рассеялись на большие углы?
7. Что представляет собой атом согласно ядерной модели?



Почему результаты опытов по рассеянию α -частиц находятся в противоречии с моделью Томсона? Что наблюдалось бы на опыте, если бы модель Томсона была верна?

Это любопытно...

Из истории открытия радиоактивности

Анри Беккерель помещал кристаллы соли урана на фотопластинку, завернутую плотной чёрной бумагой, и подвергал их в течение нескольких часов сильному воздействию солнечных лучей. После проявления фотопластинки на ней были обнаружены контуры кристаллов, прижатых к ней. Было очевидно, что урановая соль испускает какое-то излучение, проходящее через чёрную бумагу и засвечивающее фотопластинку. 26 и 27 февраля 1896 г. Беккерель подготовил опыт по наблюдению за неизвестным излучением, испускаемым солями урана. Но в этот день не было солнца, и вся установка (на фотопластинке в рамке на чёрной ткани, прикрытой алюминиевой пластинкой, находился тонкий медный крест, над которым располагался препарат с двойным сульфатом калия и урана) была заперта в ящике стола. Проявив 1 марта эти пластинки, Беккерель неожиданно обнаружил на них весьма чёткий контур креста. Учёный предположил, что действие излучения происходило в темноте, и новые, специально предпринятые опыты подтвердили это предположение. Беккерель пришёл к выводу, что здесь речь идёт о новом самопроизвольном явлении, интенсивность которого заметно не убывает во времени.

Около двух лет Беккерель был единственным физиком, который занимался этими исследованиями. Позднее, в 1898 г., к нему присоединились

супруги **Мария Склодовская** (1867—1934) и **Пьер Кюри** (1859—1906), а после открытия радия к концу столетия число исследователей резко возросло. Эксперименты Беккереля послужили отправной точкой для последующих исследований. Один из основных фактов, установленных учёным, был следующий: все соли урана, независимо от своего происхождения, испускают лучи одной и той же природы, интенсивность которых зависит только от количества урана, содержащегося в соли. Таким образом, эта способность оказывается атомным свойством, присущим элементу урану.

(По книге: М. Льюэци. История физики.)



ЗАДАНИЕ

- Используя Интернет, найдите имена Нобелевских лауреатов, которым были присуждены премии за исследования в области радиоактивности. Расскажите об одном из них.

§ 57

ПОГЛОЩЕНИЕ И ИСПУСКАНИЕ СВЕТА АТОМАМИ. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ



НИЛЬС БОР

(1885—1962)

Датский физик-теоретик, общественный деятель, один из создателей современной физики. Создал теорию водородоподобного атома, основанную на двух постулатах

Модель атома Резерфорда прекрасно описала результаты опыта по рассеянию α -частиц. Однако она не смогла объяснить устойчивость (сколь угодно долгое существование) атомов и линейчатый характер их спектров. Действительно, согласно модели Резерфорда, электроны, вращающиеся вокруг ядра, движутся ускоренно, следовательно, должны излучать электромагнитную волну. При этом они будут терять энергию и в результате упадут на ядро. Атом перестанет существовать. При приближении к ядру частота вращения, а значит, и частота излучения должны непрерывно увеличиваться. Поэтому спектр излучения атома должен быть непрерывным. В действительности опыт показывает, что атомы устойчивы и их спектры линейчатые.

Преодолеть эти противоречия модели атома Резерфорда удалось в 1913 г. датскому физiku **Нильсу Бору**.

Он, применив идею Планка о квантах, сделал важный шаг в развитии представлений о строении атома. Бор сформулировал постулаты, которым должна удовлетворять новая теория строения атома.

1. Атом может находиться только в особых, стационарных состояниях. Каждому состоянию соответствует определённое значение энергии — энергетический уровень. Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает и не поглощает.

Стационарным состояниям соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Номера стационарных орбит и энергетических уровней (начиная с первого) в общем случае обозначаются латинскими буквами: n , k и т. д. Радиусы орбит, как и энергии стационарных состояний, могут принимать не любые, а определённые дискретные значения. Первая орбита расположена ближе всех к ядру.

2. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n . Поглощение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

$$h\nu = E_k - E_n$$

Согласно закону сохранения энергии, энергия излучённого фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = E_k - E_n.$$

$$\nu = \frac{E_k - E_n}{h}$$

Из этого уравнения следует, что атом может излучать свет только с частотами

$$\nu = \frac{E_k - E_n}{h}.$$

Поэтому спектр испускания атома линейчатый.

Атом может также поглощать фотоны при переходах между своими стационарными состо-

яниями. Поэтому частоты в спектрах поглощения атома равны частотам в их спектрах испускания, т. е. атомы могут поглощать свет только тех частот, которые они способны излучать.

Состояние атома, в котором все электроны находятся на стационарных орбитах с наименьшей возможной энергией, называют **основным**. В этом состоянии энергия атома наименьшая. Все другие состояния атома называют **возбуждёнными**.

Атомы различных химических элементов отличаются друг от друга количеством протонов в ядре и электронов в атоме, а следовательно, и энергиями взаимодействия электронов и ядер. Поэтому у атомов каждого химического элемента имеется свой набор энергетических уровней. И переходу с более высокого энергетического уровня на более низкий будут соответствовать характерные линии в спектре испускания, отличные от линий в спектре другого элемента.



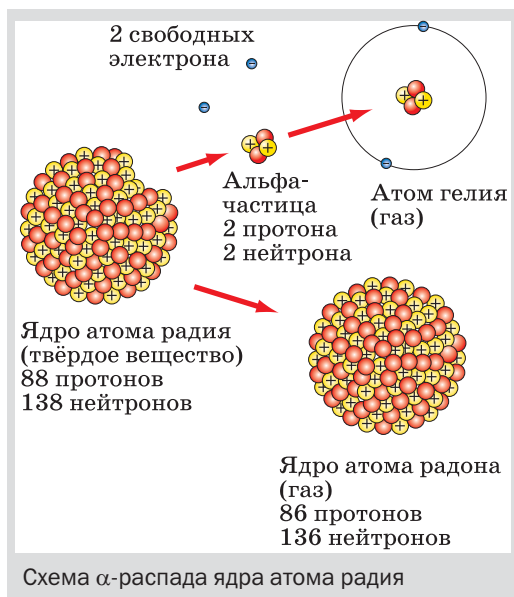
1. Сформулируйте постулаты Бора.
2. Запишите уравнения для определения энергии и частоты излучённого фотона.
3. Какое состояние атома называют основным; возбуждённым?
4. Как объясняется совпадение линий в спектрах испускания и поглощения данного химического элемента?

§ 58

РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

В 1903 г. (т. е. ещё до обнаружения существования атомных ядер) Резерфорд и его сотрудник, английский химик **Фредерик Содди** (1877—1956) обнаружили, что радиоактивный элемент радий в процессе α -распада (т. е. самопроизвольного излучения α -частиц) превращается в другой химический элемент — радон.

Радий и радон отличаются по своим физическим и химическим свойствам. Радий — металл, при обычных условиях он находится в твёрдом состоянии, а радон — инертный газ. Атомы этих химических элементов отличаются



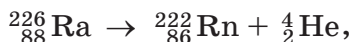
массой, зарядом ядра, числом электронов в электронной оболочке. Они по-разному вступают в химические реакции.

Дальнейшие опыты с различными радиоактивными препаратами показали, что *не только при α -распаде, но и при β -распаде происходит превращение одного химического элемента в другой.*

После того как в 1911 г. Резерфордом была предложена ядерная модель атома, стало очевидным, что *именно ядро претерпевает изменения при радиоактивных превращениях.* Действительно, если бы изменения затрагивали только электронную оболочку атома

(например, потеря одного или нескольких электронов), то при этом атом превращался бы в ион того же самого химического элемента, а вовсе не в атом другого элемента, с другими физическими и химическими свойствами.

Реакция α -распада ядра атома радия с превращением его в ядро атома радона записывается так:



где знаком ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ обозначено ядро атома радия, знаком ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ — ядро атома радона и знаком ${}^4_2\text{He}$ — α -частица, или, что то же самое, ядро атома гелия (ядро атома обозначают с помощью химического символа атома, которому оно принадлежит).

Число, стоящее перед буквенным обозначением ядра сверху, называют **массовым числом**, а снизу — **зарядовым числом** (или атомным номером).

Массовое число ядра атома данного химического элемента с точностью до целых чисел равно числу атомных единиц массы, содержащихся в массе этого ядра. (Напомним, что одна атомная единица массы (сокращённо 1 а. е. м.) равна $\frac{1}{12}$ части массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$.)

Зарядовое число ядра атома данного химического элемента равно числу элементарных электрических зарядов, содержащихся в заряде этого ядра. (Напомним, что элементарным электрическим зарядом называют наименьший электрический заряд, положительный или отрицательный, равный по модулю заряду электрона.)

Можно сказать и так: *зарядовое число равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах.*

Оба эти числа — массовое и зарядовое — всегда целые и положительные. Они не имеют размерности (т. е. единиц измерения), поскольку указывают, во сколько раз масса и заряд ядра больше единичных.

По уравнению реакции можно увидеть, что ядро атома радия в результате излучения им α -частицы теряет приблизительно четыре атомные единицы массы и два элементарных заряда, превращаясь при этом в ядро атома радона.

В процессе радиоактивного распада выполняются *законы сохранения массового числа и заряда*, поэтому массовое число (226) и заряд (88) распадающегося ядра атома радия равны соответственно сумме массовых чисел ($222 + 4 = 226$) и сумме зарядов ($86 + 2 = 88$) ядер атомов радона и гелия, образовавшихся в результате этого распада.

Таким образом, открытия, сделанные Резерфордом и Содди, показали, что **ядра атомов имеют сложный состав**, т. е. состоят из

каких-то частиц. Кроме того, стало ясно, что *радиоактивность — это способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием частиц.*

Интенсивность радиоактивного излучения зависит от количества ядер, способных распадаться. Их количество изменяется с течением времени из-за распада. Скорость распада, а значит, и скорость уменьшения количества радиоактивных атомов у разных веществ различна. Для характеристики этого существует физическая величина, которую называют **периодом полураспада**.

Период полураспада T — это промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое.

Выведем зависимость числа N радиоактивных атомов от времени t и периода полураспада T . Время будем отсчитывать от момента начала наблюдения $t_0 = 0$, когда число радиоактивных атомов в источнике излучения было равно N_0 . Тогда через промежуток времени $t_1 = T$ число радиоактивных атомов будет

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot N_0 = \frac{N_0}{2^1};$$

$$\text{через } t_2 = 2T — N_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^1} = \frac{N_0}{2^2};$$

$$\text{через } t_3 = 3T — N_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2^2} = \frac{N_0}{2^3} \text{ и т. д.,}$$

$$N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$$

$$\text{а через } t = nT — N = \frac{N_0}{2^n}.$$

Формулу

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

называют **законом радиоактивного распада**. Её можно записать и в другом виде, напри-

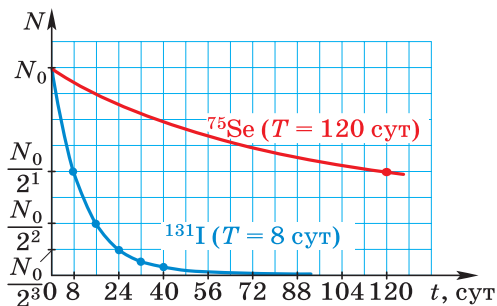


Рис. 183. График зависимости числа радиоактивных атомов от времени для изотопов йода и селена

графики зависимости N от t , построенные для изотопов йода (^{131}I , $T_{\text{I}} = 8$ сут) и селена (^{75}Se , $T_{\text{Se}} = 120$ сут).

мер $N = \frac{N_0}{2^{t/T}}$. Из последней формулы следует, что чем больше T , тем меньше $2^{t/T}$ и тем больше N (при заданных значениях N_0 и t). Значит, чем больше период полураспада элемента, тем дольше он «живёт» и излучает, представляя опасность для живых организмов. В этом убеждают и представленные на рисунке 183



1. Что происходит с радиоактивными химическими элементами в результате α - и β -распада? Приведите примеры.
2. Какая часть атома — ядро или электронная оболочка — претерпевает изменения при радиоактивном распаде? Почему вы так думаете?
3. Чему равно массовое число; зарядовое число?
4. На примере реакции α -распада радия объясните законы сохранения заряда (зарядового числа) и массового числа.
5. Какой вывод следовал из открытия, сделанного Резерфордом и Содди?
6. Что такое радиоактивность?
7. Что называют периодом полураспада? Что характеризует эта физическая величина?
8. В чём состоит закон радиоактивного распада?



УПРАЖНЕНИЕ 50

1. Определите массу (в а. е. м. с точностью до целых чисел) и заряд (в элементарных зарядах) ядер атомов следующих химических элементов: углерода $^{12}_6\text{C}$; лития ^6_3Li ; кальция $^{40}_{20}\text{Ca}$.
2. Сколько электронов содержится в атомах каждого из химических элементов, перечисленных в предыдущей задаче?
3. Определите (с точностью до целых чисел), во сколько раз масса ядра атома лития ^6_3Li больше массы ядра атома водорода ^1_1H .
4. Для атома бериллия ^9_4Be определите: а) массу ядра в а. е. м. (с точностью до целых чисел); б) заряд ядра в элементарных электрических зарядах; в) число электронов в атоме.
5. Пользуясь законами сохранения массового числа и заряда, определите массовое число и заряд ядра химического элемента X, образующегося в результате следующей реакции β -распада:

$$^{14}_6\text{C} \rightarrow \text{X} + ^0_{-1}\text{e},$$
 где $^0_{-1}\text{e}$ — β -частица (электрон).

Найдите этот элемент в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева. Как его называют?

6. Какой процент атомов радиоактивного вещества останется через 6 суток, если период его полураспада равен 2 суткам?

§ 59

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТИЦ

Для дальнейшего развития ядерной физики (в частности, для исследования строения атомных ядер) необходимы были специальные устройства, с помощью которых можно было бы регистрировать ядра и различные частицы, а также изучать их взаимодействия.

Один из известных вам методов регистрации частиц — метод сцинтилляций — не даёт необходимой точности, так как результат подсчёта вспышек на экране в большой степени зависит от остроты зрения наблюдателя. Кроме того, длительное наблюдение оказывается невозможным, так как глаз быстро устаёт.

Более совершенным прибором для регистрации частиц является прибор, изобретённый в 1908 г. немецким физиком **Гансом Гейгером** (1882—1945), который называют **счётчиком Гейгера**.

Для рассмотрения устройства и принципа действия этого прибора обратимся к рисунку 184. Счётчик Гейгера состоит из металлического цилиндра, являющегося катодом (т. е. отрицательно заряженным электродом), и натянутой вдоль его оси тонкой проволоочки — анода (т. е. положительного электрода). Катод и анод через резистор сопротивлением R присоединены к источнику высокого напряжения (порядка 200—1000 В), благодаря чему в пространстве между электродами возникает сильное электрическое поле. Оба электрода помещают в герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом (обычно аргоном).

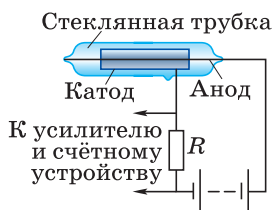


Рис. 184. Схема устройства счётчика Гейгера

Пока газ не ионизирован, ток в электрической цепи источника напряжения отсутствует. Если же в трубку сквозь её стенки влетает какая-нибудь частица, способная ионизировать атомы газа, то в трубке образуется некоторое количество свободных зарядов — электронно-ионных пар. Электроны и ионы начинают двигаться к соответствующим электродам.

Если напряжённость электрического поля достаточно велика, то электроны при движении между соударениями с молекулами газа (т. е. на длине свободного пробега) ускоряются электрическим полем и приобретают достаточно большую энергию. Это позволяет им ионизировать атомы газа, образуя новое поколение ионов и электронов, которые тоже могут принять участие в ионизации, и т. д. В трубке образуется большое количество свободных электронов и ионов — электронно-ионная лавина. В результате этого происходит кратковременное и резкое возрастание силы тока в цепи и напряжения на резисторе R . Этот импульс напряжения, свидетельствующий о попадании в счётчик частицы, регистрируется специальным устройством.

Поскольку сопротивление R очень велико (порядка 10^9 Ом), то в момент протекания тока напряжение на нём очень большое, в результате чего напряжение между катодом и анодом резко уменьшается и разряд автоматически прекращается (так как это напряжение становится недостаточным для образования новых поколений электронно-ионных пар). Прибор готов к регистрации следующей частицы.

Счётчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов, но существуют модели, пригодные и для регистрации γ -квантов.

Счётчик позволяет только регистрировать тот факт, что через него пролетает частица. Гораздо большие возможности для изучения микромира даёт прибор, изобретённый шотландским физиком **Чарлзом Вильсоном** (1869—1959) в 1912 г. и называемый *камера Вильсона*.

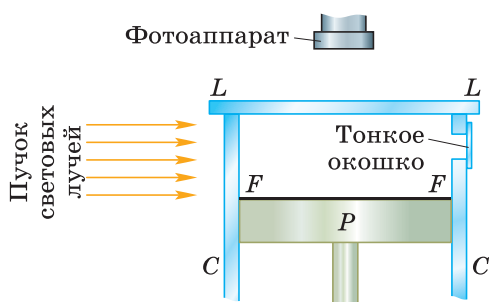


Рис. 185. Схема устройства камеры Вильсона

Камера Вильсона (рис. 185) состоит из невысокого стеклянного цилиндра CC со стеклянной крышкой LL (на рисунке цилиндр показан в разрезе). Внутри цилиндра может двигаться поршень P . На дне камеры находится чёрная ткань FF . Благодаря тому что ткань увлажнена смесью воды с этиловым спиртом, воздух в камере насыщен парами этих жидкостей.

При быстром движении поршня вниз находящиеся в камере воздух и пары жидкостей расширяются, их внутренняя энергия уменьшается, температура понижается.

В обычных условиях это вызвало бы конденсацию паров (появление тумана). Однако в камере Вильсона этого не происходит, так как из неё предварительно удаляются так называемые *центры конденсации* (пылинки, ионы и пр.). Поэтому в данном случае при понижении температуры в камере пары жидкостей становятся *пересыщенными*, т. е. переходят в крайне неустойчивое состояние, при котором они будут легко конденсироваться на любых образующихся в камере центрах конденсации, например на ионах.

Излучаемые частицы влетают в камеру через тонкое окошко (иногда источник частиц помещают внутри камеры). Пролетая с большой скоростью через газ, частицы создают на своём пути ионы. Эти ионы и становятся центрами конденсации, на которых пары жидкостей конденсируются в виде маленьких капелек (водяной пар конденсируется преимущественно на отрицательных ионах, пары этилового спирта — на положительных). Вдоль всего пути частицы возникает тонкий след из капелек (*трек*), благодаря чему её траектория движения становится видимой.

Если поместить камеру Вильсона в магнитное поле, то траектории заряженных частиц

искривляются. По направлению изгиба следа можно судить о знаке заряда частицы, а по радиусу кривизны определять её массу, энергию, заряд.

Треки существуют в камере недолго, так как воздух нагревается, получая тепло от стенок камеры, и капельки испаряются. Чтобы получить новые следы, необходимо удалить имеющиеся ионы с помощью электрического поля, сжать воздух поршнем, выждать, пока воздух в камере, нагретый при сжатии, охладится, и произвести новое расширение.

Обычно треки частиц в камере Вильсона не только наблюдают, но и фотографируют. При этом камеру освещают сбоку мощным пучком световых лучей, как показано на рисунке 185.

С помощью камеры Вильсона был сделан ряд важнейших открытий в области ядерной физики и физики элементарных частиц.

На похожем принципе основано действие изобретённой в 1952 г. **пузырьковой камеры**. Вместо пересыщенного пара в ней используется перегретая выше точки кипения жидкость (например, жидкий водород). Жидкость не кипит, поскольку из неё тщательно удалены посторонние тела. При движении в этой жидкости заряженной частицы вдоль её траектории образуется ряд пузырьков пара.

Пузырьковая камера обладает бóльшим быстродействием по сравнению с камерой Вильсона. Размеры пузырьковых камер могут во много раз превышать размеры камер Вильсона (несколько кубических метров против нескольких кубических сантиметров) и, кроме того, жидкость плотнее пара — эти обстоятельства повышают вероятность обнаружения частиц.



1. По рисунку 184 расскажите об устройстве и принципе действия счётчика Гейгера.
2. Для регистрации каких частиц применяется счётчик Гейгера?
3. По рисунку 185 расскажите об устройстве и принципе действия камеры Вильсона.
4. Какие характеристики частиц можно определить с помощью камеры Вильсона, помещённой в магнитное поле?
5. В чём преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона? Чем отличаются эти приборы?

Когда выяснилось, что ядра атомов имеют сложное строение, встал вопрос о том, из каких именно частиц они состоят.

В 1913 г. Резерфорд выдвинул гипотезу о том, что одной из частиц, входящих в состав атомных ядер всех химических элементов, является ядро атома водорода.

Основанием для такого предположения послужил ряд появившихся к тому времени фактов, полученных опытным путём. В частности, было известно, что массы атомов химических элементов превышают массу атома водорода в целое число раз (т. е. кратны ей).

В 1919 г. Резерфорд поставил опыт по исследованию взаимодействия α -частиц с ядрами атомов азота.

В этом опыте α -частица, летящая с огромной скоростью, при попадании в ядро атома азота выбивала из него какую-то частицу. По предположению Резерфорда, этой частицей было ядро атома водорода, которое Резерфорд назвал **протоном** (от греч. *протос* — первый). Но поскольку наблюдение этих частиц велось методом сцинтилляций, нельзя было точно определить, какая именно частица вылетала из ядра атома азота.

Удостовериться в том, что из ядра атома действительно вылетал протон, удалось только несколько лет спустя, когда реакция взаимодействия α -частицы с ядром атома азота была проведена в камере Вильсона.

Через прозрачное круглое окошко камеры Вильсона даже невооружённым глазом можно увидеть треки (т. е. траектории) частиц, быстро движущихся в ней (рис. 186).

На рисунке видны расходящиеся веером прямые. Это следы α -частиц, которые пролетели сквозь пространство камеры, не испытав соударений с ядрами атомов азота. Но след одной

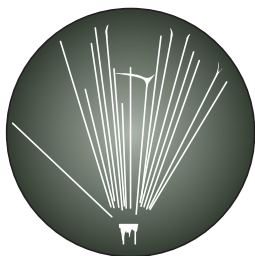
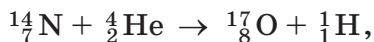


Рис. 186. Фотография треков заряженных частиц, полученных в камере Вильсона

α -частицы раздваиваются, образуя так называемую «вилку». Это означает, что в точке раздвоения трека произошло взаимодействие α -частицы с ядром атома азота, в результате чего образовались две частицы. По характеру искривления их треков при помещении камеры Вильсона в магнитное поле определили, что в результате столкновения образовались ядра атомов кислорода и водорода.

Реакцию взаимодействия ядра азота с α -частицами с образованием ядер кислорода и водорода записывают так:



где символом ${}^1_1\text{H}$ обозначен протон, т. е. ядро атома водорода, с массой, приблизительно равной 1 а. е. м. (точнее, 1,0072765 а. е. м.), и положительным зарядом, равным элементарному (т. е. модулю заряда электрона). Для обозначения протона используют также символ ${}_1p$.

В дальнейшем было исследовано взаимодействие α -частиц с ядрами атомов других элементов: бора (B), натрия (Na), алюминия (Al), магния (Mg) и многих других. В результате выяснилось, что из всех этих ядер α -частицы выбивали протоны. Это давало основания полагать, *что протоны входят в состав ядер атомов всех химических элементов.*

Открытие протона не давало полного ответа на вопрос о том, из каких частиц состоят ядра атомов. Если считать, что атомные ядра состоят только из протонов, то возникает противоречие.

Покажем на примере ядра атома бериллия (${}^9_4\text{Be}$), в чём заключается это противоречие.

Допустим, что ядро ${}^9_4\text{Be}$ состоит только из протонов. Поскольку заряд каждого протона равен одному элементарному заряду, то число протонов в ядре должно быть равно зарядовому числу, в данном случае четырём.

Но если бы ядро бериллия действительно состояло только из четырёх протонов, то его масса была бы приблизительно равна 4 а. е. м. (так как масса каждого протона приблизительно равна 1 а. е. м.).

Однако это противоречит опытным данным, согласно которым масса ядра атома бериллия приблизительно равна 9 а. е. м.

Таким образом, становится ясно, что в ядра атомов помимо протонов входят ещё какие-то частицы.

В связи с этим в 1920 г. Резерфордом было высказано предположение о существовании электрически нейтральной частицы с массой, приблизительно равной массе протона.

В начале 30-х гг. XX в. были обнаружены неизвестные ранее лучи, которые называли *бериллиевым излучением*, так как они возникали при бомбардировке α -частицами бериллия.

В 1932 г. английский учёный **Джеймс Чедвик** (ученик Резерфорда) с помощью опытов, проведённых в камере Вильсона, доказал, что бериллиевое излучение представляет собой поток электрически нейтральных частиц, масса которых приблизительно равна массе протона. Отсутствие у исследуемых частиц электрического заряда следовало, в частности, из того, что они не отклонялись ни в электрическом, ни в магнитном поле. А массу частиц удалось оценить по их взаимодействию с другими частицами.

Эти частицы были названы **нейтронами**. Нейтрон принято обозначать символом 1_0n . Точные измерения показали, что масса нейтрона равна 1,0086649 а. е. м., т. е. чуть больше массы протона. Во многих случаях массу нейтрона (как и массу протона) считают равной 1 а. е. м. Поэтому сверху перед символом нейтрона ставят единицу. Нуль внизу означает отсутствие электрического заряда.



ДЖЕЙМС ЧЕДВИК

(1891—1974)

Английский физик-экспериментатор. Работы в области радиоактивности и ядерной физики. Открыл нейтрон



1. Какой вывод был сделан на основании фотографии треков частиц в камере Вильсона (см. рис. 186)? **2.** Как иначе называют и каким символом обозначают ядро атома водорода? Каковы его масса и заряд? **3.** Какое предположение (относительно состава ядер) позволяли сделать результаты опытов по взаимодействию α -частиц с ядрами атомов различных элементов? **4.** К какому противоречию приводит предположение о том, что ядра атомов состоят только из протонов? Поясните это на примере. **5.** Как было доказано отсутствие у нейтронов электрического заряда? Как была оценена их масса? **6.** Как обозначается нейтрон, какова его масса по сравнению с массой протона?



УПРАЖНЕНИЕ 51

- Рассмотрите запись ядерной реакции взаимодействия ядер азота и гелия, в результате чего образуются ядра кислорода и водорода. Сравните суммарный заряд взаимодействующих ядер с суммарным зарядом ядер, образованных в результате этого взаимодействия. Сделайте вывод о том, выполняется ли закон сохранения электрического заряда в данной реакции.

§ 61

СОСТАВ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Открытие нейтрона дало толчок к пониманию того, как устроены ядра атомов.

В том же 1932 г., когда был открыт нейтрон, советский физик **Дмитрий Дмитриевич Иваненко** (1904—1994) и немецкий физик **Вернер Гейзенберг** (1901—1976) предложили **протонно-нейтронную модель ядер**, согласно которой ядро любого атома состоит из двух видов частиц — протонов и нейтронов. Справедливость этой модели была впоследствии подтверждена экспериментально.

Протоны и нейтроны, составляющие ядро атома, называют **нуклонами** (от лат. *nucleus* — ядро).

Общее число нуклонов в ядре называют массовым числом и обозначают буквой A .

Так, например, для азота ${}^{14}_7\text{N}$ массовое число $A = 14$, для железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ $A = 56$, для урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ $A = 235$.

Массовое число A численно равно массе ядра m , выраженной в атомных единицах массы и округлённой до целых чисел (поскольку масса каждого нуклона примерно равна 1 а. е. м.). Например, для азота $m \approx 14$ а. е. м., для железа $m \approx 56$ а. е. м. и т. д.

Число протонов в ядре называют зарядовым числом и обозначают буквой Z .

Например, для азота ${}^{14}_7\text{N}$ зарядовое число $Z = 7$, для железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ $Z = 26$, для урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ $Z = 92$ и т. д.

Заряд каждого протона равен элементарному электрическому заряду. Поэтому зарядовое число Z численно равно заряду ядра, выраженному в элементарных электрических зарядах. Для каждого химического элемента зарядовое число равно атомному (порядковому) номеру в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева.

Ядро любого химического элемента в общем виде обозначается так: ${}^A_Z\text{X}$ (под X подразумевается символ химического элемента).

Число нейтронов в ядре обычно обозначают буквой N . Поскольку массовое число A представляет собой общее число протонов и нейтронов в ядре, то можно записать: $A = Z + N$.

На основе протонно-нейтронной модели строения атомных ядер было дано объяснение некоторым экспериментальным фактам, открытым в первые два десятилетия XX в.

Так, в ходе изучения свойств радиоактивных элементов было обнаружено, что у одного и того же химического элемента встречаются атомы с различными по массе ядрами.

Ядра с одинаковым зарядом имеют один и тот же порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева, т. е. занимают в таблице одну и ту же клетку (место). Поэтому такие атомы называют *изотопами* (от греч. *изос* — одинаковый и *топос* — место).

Изотопы — это атомы одного и того же химического элемента, различающиеся массой атомных ядер.

Протонно-нейтронная модель ядра позволила объяснить (примерно через два десятилетия после открытия изотопов), почему атомные ядра с одним и тем же зарядом обладают разными массами. Очевидно, ядра изотопов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов.

Так, например, существует три изотопа водорода: ${}^1_1\text{H}$ (протий), ${}^2_1\text{H}$ (дейтерий) и ${}^3_1\text{H}$ (тритий). Ядро протия ${}^1_1\text{H}$ вообще не имеет нейтронов — оно представляет собой один протон. В состав ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ входят две частицы: протон и нейтрон. Ядро трития ${}^3_1\text{H}$ состоит из трёх частиц: одного протона и двух нейтронов.

Гипотеза о том, что атомные ядра состоят из *протонов* и *нейтронов*, подтверждалась многими экспериментальными фактами.

Но возникал вопрос: почему ядра не распадаются на отдельные нуклоны под действием сил электростатического отталкивания между положительно заряженными протонами?

Расчёты показывают, что нуклоны не могут удерживаться вместе за счёт сил притяжения гравитационной или магнитной природы, поскольку эти силы существенно меньше электростатических.

В поисках ответа на вопрос об устойчивости атомных ядер учёные предположили, что *между всеми нуклонами в ядрах* действуют какие-

то особые силы притяжения, которые значительно превосходят электростатические силы отталкивания между протонами. Эти силы называют **ядерными**.

Гипотеза о существовании ядерных сил оказалась правильной. Выяснилось, что ядерные силы являются короткодействующими: на расстоянии 10^{-15} м они примерно в 100 раз больше сил электростатического взаимодействия, но уже на расстоянии 10^{-14} м они оказываются ничтожно малыми. Другими словами, ядерные силы действуют на расстояниях, сравнимых с размерами самих ядер.



1. Как называют протоны и нейтроны вместе? **2.** Что называют массовым числом? Что можно сказать о числовом значении массы атома (в а. е. м.) и его массовом числе? **3.** Что можно сказать о зарядовом числе, заряде ядра (выраженном в элементарных электрических зарядах) и порядковом номере в таблице Д. И. Менделеева для любого химического элемента? **4.** Как связаны между собой массовое число, зарядовое число и число нейтронов в ядре? **5.** Как в рамках протонно-нейтронной модели ядра объяснить существование ядер с одинаковыми зарядами и различными массами? **6.** Какой вопрос возникал в связи с гипотезой о том, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов? Какое предположение пришлось сделать учёным для ответа на этот вопрос? **7.** Как называют силы притяжения между нуклонами в ядре и каковы их характерные особенности?



Как вы думаете, действуют ли между нуклонами в ядре силы гравитационного притяжения (т. е. силы всемирного тяготения)? Ответ обоснуйте.

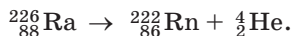


УПРАЖНЕНИЕ 52

- 1.** Сколько нуклонов в ядре атома бериллия ${}^9_4\text{Be}$? Сколько в нём протонов; нейтронов?
- 2.** Для атома калия ${}^{39}_{19}\text{K}$ определите: а) зарядовое число; б) число протонов; в) порядковый номер в таблице Д. И. Менделеева; г) число нуклонов; д) число нейтронов.
- 3.** Определите с помощью таблицы Д. И. Менделеева, атом какого химического элемента имеет: а) 3 протона в ядре; б) 9 электронов.

4. При α -распаде исходное ядро, излучая α -частицу ${}^4_2\text{He}$, превращается в ядро атома другого химического элемента.

Например,

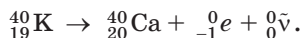


На сколько клеток и в какую сторону (к началу или к концу таблицы Д. И. Менделеева) смещён образовавшийся элемент по отношению к исходному?

Перепишите в тетрадь данное ниже *правило смещения для α -распада*, заполнив пропуски:

при α -распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетки ближе к её ..., чем исходный.

5. При β -распаде исходного ядра один из входящих в это ядро нейтронов превращается в протон, электрон ${}^0_{-1}e$ и антинейтрино ${}^0_0\bar{\nu}$ (частицу, легко проходящую сквозь земной шар и, возможно, не имеющую массы). Электрон и антинейтрино вылетают из ядра, а протон остаётся в ядре, увеличивая его заряд на единицу. Например,



Перепишите данное ниже *правило смещения для β -распада*, заполнив пропуски:

при β -распаде одного химического элемента образуется другой элемент, который расположен в таблице Д. И. Менделеева на ... клетку ближе к ... таблицы, чем исходный.

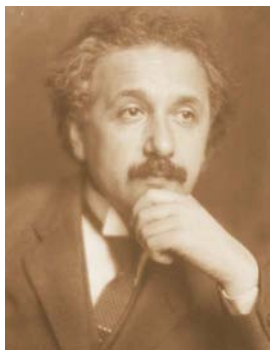
§ 62

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ. ДЕФЕКТ МАССЫ

Для того чтобы разбить ядро на отдельные, не взаимодействующие между собой (свободные) нуклоны, необходимо произвести работу по преодолению ядерных сил, т. е. сообщить ядру определённую энергию. Наоборот, при соединении свободных нуклонов в ядро выделяется такая же энергия (по закону сохранения энергии).

Минимальную энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называют энергией связи ядра.

Каким же образом можно определить величину энергии связи ядра?



АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

(1879—1955)

Немецкий физик-теоретик, один из создателей современной физики. Открыл закон взаимосвязи массы и энергии, создал специальную и общую теории относительности

Наиболее простой путь нахождения этой энергии основан на применении *закона о взаимосвязи массы и энергии*, открытого немецким учёным **Альбертом Эйнштейном** в 1905 г.

Согласно этому закону между массой m системы частиц и *энергией покоя*, т. е. внутренней энергией E_0 этой системы, существует прямая пропорциональная зависимость:

$$E_0 = mc^2,$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

Если энергия покоя системы частиц в результате каких-либо процессов изменится на величину ΔE_0 , то это повлечёт за собой соответствующее изменение массы этой системы на величину Δm , причём связь между этими величинами выразится равенством:

$$E_0 = mc^2$$

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2},$$

или

$$\Delta E_0 = \Delta mc^2.$$

Таким образом, при слиянии свободных нуклонов в ядро в результате выделения энергии (которая уносится излучаемыми при этом фотонами) должна уменьшиться и масса нуклонов. Другими словами, **масса ядра всегда меньше суммы масс нуклонов, из которых оно состоит.**

Недостаток массы ядра Δm по сравнению с суммарной массой составляющих его нуклонов можно записать так:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}},$$

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - M_{\text{я}}$$

где $M_{\text{я}}$ — масса ядра, Z и N — число протонов и нейтронов в ядре, m_p и m_n — массы свободных протона и нейтрона.

Величину Δm называют **дефектом массы**. Наличие дефекта массы подтверждается многочисленными опытами.

Рассчитаем, например, энергию связи ΔE_0 ядра атома дейтерия ${}^2_1\text{H}$ (тяжёлого водорода), состоящего из одного протона и одного нейтрона. Другими словами, рассчитаем энергию, необходимую для расщепления ядра на протон и нейтрон.

Для этого определим сначала дефект массы Δm этого ядра, взяв приближённые значения масс нуклонов и массы ядра атома дейтерия из соответствующих таблиц. Согласно табличным данным, масса протона приблизительно равна 1,0073 а. е. м., масса нейтрона — 1,0087 а. е. м., масса ядра дейтерия — 2,0141 а. е. м. Значит, $\Delta m = (1,0073 \text{ а. е. м.} + 1,0087 \text{ а. е. м.}) - 2,0141 \text{ а. е. м.} = 0,0019 \text{ а. е. м.}$

Чтобы энергию связи получить в джоулях, дефект массы нужно выразить в килограммах.

Учитывая, что

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

получим:

$$\begin{aligned} \Delta m &= 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 0,0019 = \\ &= 3,2 \cdot 10^{-30} \text{ кг}. \end{aligned}$$

Подставим это значение дефекта массы в формулу энергии связи:

$$\begin{aligned} \Delta E_0 &= 3,2 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 = \\ &= 2,88 \cdot 10^{-13} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = 2,88 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Энергию, выделяющуюся или поглощающуюся в процессе любых ядерных реакций, можно рассчитать, если известны массы взаимодействующих и образующихся в результате этого взаимодействия ядер и частиц.



1. Что называют энергией связи ядра? **2.** Запишите формулу для определения дефекта массы любого ядра. **3.** Запишите формулу для расчёта энергии связи ядра.



УПРАЖНЕНИЕ 53

- Определите дефект массы ядра ${}^6_3\text{Li}$. Выделяется или поглощается энергия при бомбардировке таких ядер ядрами дейтерия: ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$?

Массы ядер: ${}^6_3\text{Li}$ — 6,0135 а. е. м., ${}^4_2\text{He}$ — 4,0015 а. е. м.

§ 63

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

Деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами было открыто в 1939 г. немецкими учёными **Отто Ганом** и **Фрицем Штрассманом**.

Рассмотрим механизм этого явления. На рисунке 187, а условно изображено ядро атома урана ${}^{235}_{92}\text{U}$. Поглотив лишний нейтрон, ядро возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму (рис. 187, б).

Вы уже знаете, что в ядре действует два вида сил: *электрические силы отталкивания между протонами*, стремящиеся разорвать ядро, и *ядерные силы притяжения между всеми нуклонами*, благодаря которым ядро не распадается. Но ядерные силы — короткодействующие, поэтому в вытянутом ядре они уже не могут удерживать сильно удалённые друг от друга части ядра. Под действием электрических сил отталкивания ядро разрывается на две части (рис. 187, в), которые разлетаются в разные стороны с огромной скоростью и излучают при этом 2—3 нейтрона.

Получается, что часть внутренней энергии ядра переходит в кинетическую энергию разлетающихся осколков и частиц. Осколки быст-

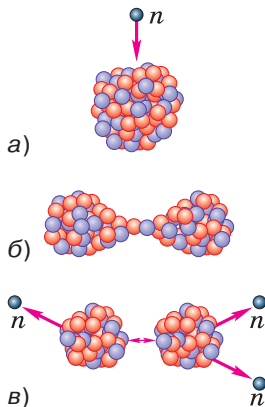


Рис. 187. Процесс деления ядра урана под воздействием попавшего в него нейтрона



ОТТО ГАН

(1879—1968)

Немецкий физик, учёный-новатор в области радиохимии. Открыл расщепление урана, ряд радиоактивных элементов



ФРИЦ ШТРАССМАН

(1902—1980)

Немецкий физик и химик. Работы относятся к ядерной химии, ядерному делению. Дал химическое доказательство процесса деления

ро тормозятся в окружающей среде, в результате чего их кинетическая энергия преобразуется во внутреннюю энергию среды (т. е. в энергию взаимодействия и теплового движения составляющих её частиц).

При одновременном делении большого числа ядер урана внутренняя энергия окружающей уран среды и соответственно её температура заметно возрастают (т. е. среда нагревается).

Таким образом, *реакция деления ядер урана идёт с выделением энергии в окружающую среду.*

Энергия, заключённая в ядрах атомов, колоссальна. Например, при полном делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделилось бы столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 2,5 т нефти.

Для преобразования внутренней энергии атомных ядер в электрическую на атомных электростанциях используют так называемые *цепные реакции деления ядер.*

Рассмотрим механизм протекания цепной реакции деления ядра изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$. Ядро атома урана (см. рис. 187) в результате захвата нейтрона разделилось на две части, излучив при этом три нейтрона. Два из этих нейтронов вызвали реакцию деления ещё двух ядер, при этом образовалось уже четыре нейтрона. Эти, в свою очередь, вызвали деление четырёх ядер, после чего образовалось девять нейтронов, и т. д.

Цепная реакция возможна благодаря тому, что при делении каждого ядра образуется 2—3 нейтрона, которые могут принять участие в делении других ядер.

На рисунке 188 показана схема цепной реакции, при которой общее

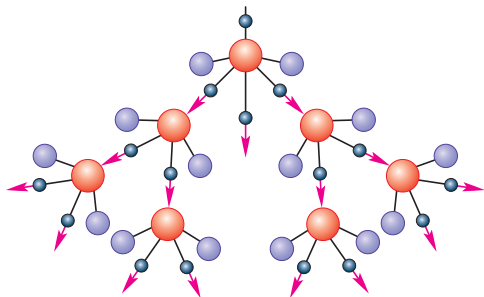


Рис. 188. Цепная реакция деления ядер урана $^{235}_{92}\text{U}$

число свободных нейтронов в куске урана *лавинообразно* увеличивается со временем. Соответственно резко возрастает число делений ядер и энергия, выделяющаяся в единицу времени. Поэтому такая реакция носит взрывной характер (она протекает в атомной бомбе), её нельзя использовать для производства электрической энергии.

Возможен и другой вариант реакции, при котором число свободных нейтронов уменьшается со временем. В этом случае цепная реакция прекращается. Следовательно, такую реакцию тоже нельзя использовать для производства электрической энергии.

В мирных целях возможно использовать энергию только такой цепной реакции, в которой число нейтронов не меняется с течением времени.

Как же добиться того, чтобы число нейтронов оставалось постоянным? Для решения этой проблемы нужно знать, какие факторы влияют на увеличение и на уменьшение общего числа свободных нейтронов в куске урана, в котором протекает цепная реакция.

Одним из таких факторов является *масса урана*. Дело в том, что не каждый нейтрон, излучённый при делении ядра (см. рис. 187), вызывает деление других ядер. Если масса (и соответственно размеры) куска урана слишком мала, то многие нейтроны вылетят за его пределы, не успев встретить на своём пути ядро, вызвать его деление и породить таким образом новое поколение нейтронов, необходимых для продолжения реакции. В этом случае цепная реакция протекать не сможет. Чтобы реакция была возможна, нужно увеличить массу урана до определённого значения, называемого **критическим**.

Почему при увеличении массы цепная реакция становится возможной? Чем больше масса куска, тем больше его размеры и тем длиннее путь, который проходят в нём нейтроны. При этом вероятность встречи нейтронов с ядрами возрастает. Соответственно увеличивается число делений ядер и число излучаемых нейтронов.

При критической массе урана число нейтронов, появившихся при делении ядер, становится равным числу потерянных нейтронов (т. е. захваченных ядрами без деления и вылетевших за пределы куска).

Поэтому их общее число остаётся неизменным. При этом цепная реакция может идти длительное время, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

Наименьшую массу урана, при которой возможно протекание цепной реакции, называют критической массой.

Если масса урана больше критической, то в результате резкого увеличения числа свободных нейтронов цепная реакция приводит к взрыву, а если меньше критической, то реакция не протекает из-за недостатка свободных нейтронов.

Уменьшить потерю нейтронов (которые вылетают из урана, не прореагировав с ядрами) можно не только за счёт увеличения массы урана, но и с помощью специальной *отражающей оболочки*. Для этого кусок урана помещают в оболочку, сделанную из вещества, хорошо отражающего нейтроны (например, из бериллия). Отражаясь от этой оболочки, нейтроны возвращаются в уран и могут принять участие в делении ядер.

Существует ещё несколько факторов, от которых зависит возможность протекания цепной реакции. Например, если кусок урана содержит слишком много *примесей* других химических элементов, то они поглощают

большую часть нейтронов и реакция прекращается.

Наличие в уране так называемого *замедлителя нейтронов* также влияет на ход реакции. Дело в том, что ядра урана-235 с наибольшей вероятностью делятся под действием медленных нейтронов. А при делении ядер образуются быстрые нейтроны. Если быстрые нейтроны замедлить, то большая их часть захватится ядрами урана-235 с последующим делением этих ядер. В качестве замедлителей используются такие вещества, как *графит*, *вода*, *тяжёлая вода* (в состав которой входит дейтерий — изотоп водорода с массовым числом 2), и некоторые другие. Эти вещества только замедляют нейтроны, почти не поглощая их.

Таким образом, возможность протекания цепной реакции определяется *массой урана*, *количеством примесей в нём*, *наличием оболочки* и *замедлителя* и некоторыми другими факторами.

Критическая масса шарообразного куска урана-235 приблизительно равна 50 кг. При этом его радиус составляет всего 9 см, поскольку уран имеет очень большую плотность.

Применяя замедлитель и отражающую оболочку и уменьшая количество примесей, удаётся снизить критическую массу урана до 0,8 кг.



1. Почему деление ядра может начаться только тогда, когда оно деформируется под действием поглощённого им нейтрона?
2. Что образуется в результате деления ядра?
3. В какую энергию переходит часть внутренней энергии ядра при его делении; кинетическая энергия осколков ядра урана при их торможении в окружающей среде?
4. Как идёт реакция деления ядер урана — с выделением энергии в окружающую среду или, наоборот, с поглощением энергии?
5. Расскажите о механизме протекания цепной реакции, используя рисунок 187.
6. Что называют критической массой урана?
7. Возможно ли протекание цепной реакции, если масса урана меньше критической; больше критической? Почему?

Ядерный реактор — это устройство, предназначенное для осуществления управляемой ядерной реакции.

Управление ядерной реакцией заключается в регулировании скорости размножения свободных нейтронов в уране, чтобы их число оставалось неизменным. При этом цепная реакция будет продолжаться столько времени, сколько это необходимо, не прекращаясь и не приобретая взрывного характера.

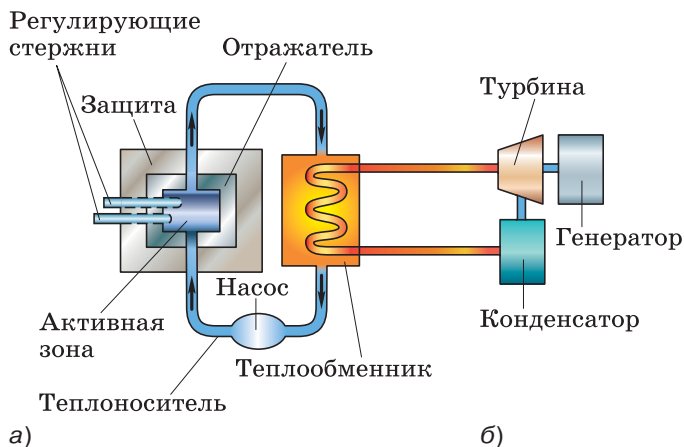
Рассмотрим устройство и принцип действия реактора, в котором в качестве делящегося вещества (его называют также *ядерным топливом* или *горючим*) используется в основном уран-235. В природном уране этого изотопа недостаточно для протекания цепной реакции (всего 0,7%), поэтому природный уран обогащают, т. е. увеличивают процентное содержание в нём урана-235 (до 5%).

Реактор, работающий на этом изотопе урана, называется **реактором на медленных нейтронах**. Он назван так потому, что уран-235 наиболее эффективно делится под действием медленных нейтронов. Поскольку при делении ядер образуются в основном быстрые нейтроны, их необходимо замедлять. Для этого в реакторе с таким ядерным топливом используется замедлитель нейтронов.

На рисунке 189, а изображены основные части реактора на медленных нейтронах. В активной зоне находится *ядерное топливо* в виде урановых стержней (они на рисунке не показаны) и *замедлитель нейтронов*, в данном случае вода.

Масса каждого уранового стержня значительно меньше критической, поэтому в одном

Рис. 189. Схема устройства ядерного реактора на медленных нейтронах



стержне цепная реакция происходит не может (это делается специально из соображений безопасности). Она начинается после погружения в активную зону всех урановых стержней, т. е. когда масса урана достигнет критического значения.

Активная зона окружена слоем вещества, отражающего нейтроны (*отражатель*), и *защитной оболочкой* из бетона, задерживающей нейтроны и другие частицы.

Для управления реакцией служат *регулирующие стержни*, эффективно поглощающие нейтроны. При их полном погружении в активную зону цепная реакция идти не может. Для запуска реактора регулирующие стержни постепенно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнётся цепная реакция деления ядер урана.

Образующиеся в процессе этой реакции нейтроны и осколки ядер, разлетаясь с большой скоростью, попадают в воду, сталкиваются с ядрами атомов кислорода и водорода, отдают им часть своей кинетической энергии и замедляются. Вода при этом нагревается, а замедленные нейтроны через какое-то время опять попадают в урановые стержни и участвуют в делении ядер.

Активная зона реактора посредством труб соединяется с *теплообменником*, образуя так называемый первый замкнутый контур. Насосы обеспечивают циркуляцию воды в этом контуре. При этом вода, нагретая в активной зоне за счёт внутренней энергии атомных ядер, проходя через теплообменник, нагревает воду в змеевике второго контура, превращая её в пар. Таким образом, *вода в активной зоне реактора служит не только замедлителем нейтронов, но и теплоносителем, отводящим тепло.*

На рисунке 189, б схематично показаны устройства, в которых энергия пара, образовавшегося в змеевике, преобразуется в электрическую энергию. Посредством этого пара вращается турбина, которая, в свою очередь, приводит во вращение ротор генератора электрического тока. Отработанный пар поступает в конденсатор и превращается в воду. Затем весь цикл повторяется.

Таким образом, при получении электрического тока на атомных электростанциях происходят следующие преобразования энергии:

часть внутренней энергии атомных ядер урана → кинетическая энергия нейтронов и осколков ядер → внутренняя энергия воды → внутренняя энергия пара → кинетическая энергия пара → кинетическая энергия ротора турбины и ротора генератора → электрическая энергия.



1. Что такое ядерный реактор? Назовите основные части реактора. Что находится в его активной зоне?
2. В чём заключается управление ядерной реакцией?
3. Для чего нужны регулирующие стержни? Какими пользуются?
4. Какую вторую функцию (помимо замедления нейтронов) выполняет вода в первом контуре реактора?
5. Какие процессы происходят во втором контуре реактора?
6. Какие преобразования энергии происходят при получении электрического тока на атомных электростанциях?



Обнинская АЭС

Одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, является энергетическая проблема. Потребление энергии растёт столь быстро, что известные в настоящее время запасы топлива окажутся исчерпанными в сравнительно короткое время.

Проблему «энергетического голода» не решает и использование энергии так называемых возобновляемых источников (энергии рек, ветра, солнца, морских волн, глубинного тепла Земли), так как они могут обеспечить в лучшем случае только 5—10% наших потребностей. В связи с этим в середине XX в. возникла необходимость поиска новых источников энергии.

В настоящее время реальный вклад в энергообеспечение вносит ядерная энергетика. Первый европейский реактор был создан в 1946 г. в Советском Союзе под руководством **Игоря Васильевича Курчатова**.

В 1954 г. в нашей стране (в г. Обнинске) была введена в действие первая в мире атомная электростанция (АЭС). Её мощность составляла всего 5000 кВт. Современные АЭС имеют в сотни раз большую мощность.

АЭС имеют ряд преимуществ перед другими видами электростанций. Основное их преимущество заключается в том, что для работы АЭС требуется очень небольшое количество топлива (напомним, что энергия, заключённая в 1 г урана, равна энергии, выделяющейся при сгорании 2,5 т нефти). В связи с этим эксплуатация атомных электростанций обходится значительно дешевле, чем тепловых (для работы которых необходимы большие затраты на добычу и транспортировку топлива).

Правда, строительство тепловых станций (ТЭС) обходится дешевле, чем атомных. Поэтому на сегодняш-



ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ КУРЧАТОВ

(1903—1960)

Российский физик, академик. Под его руководством в СССР проводились исследования в различных областях ядерной физики

ний день стоимость тепловых и атомных станций сопоставима.

Второе преимущество АЭС (при правильной их эксплуатации) заключается в их экологической чистоте по сравнению с ТЭС. Конечно, в выбросах АЭС содержатся радиоактивные газы и частицы. Но большая часть радиоактивных ядер (так называемых радионуклидов), содержащихся в выбросах АЭС, довольно быстро распадается, превращаясь в нерадиоактивные. А количество долгоживущих радионуклидов и мощность их излучения сравнительно невелики.

Что же касается электростанций, работающих на угле, то именно они являются одним из основных источников поступления в среду обитания человека долгоживущих радионуклидов. Дело в том, что в угле всегда содержатся микропримеси радиоактивных элементов, которые выносятся с продуктами сгорания, осаждаются на прилегающей местности и накапливаются на зольных полях возле ТЭС.

Кроме того, используемое на ТЭС природное органическое топливо (уголь, нефть, газ) содержит от 1,5 до 4,5% серы. Образующийся при сгорании топлива сернистый ангидрид, даже пройдя через фильтры и системы очистки, частично выбрасывается в атмосферу. Вступая в контакт с атмосферной влагой, он образует раствор серной кислоты и вместе с дождями выпадает на землю. Такие кислотные дожди наносят огромный ущерб растительности, разрушают структуру почвы и значительно меняют её состав (для восстановления которого необходима не одна сотня лет).

Неблагоприятные экологические последствия связаны и с использованием энергии рек. Эти последствия заключаются в отчуждении больших площадей земли (в связи со строительством водохранилищ и образованием вследствие этого болот), гибелью рыбы в результате перекрытия рек и т. д.



а)



б)



в)

Атомные электростанции:
а — Нововоронежская;
б — Белоярская;
в — Ростовская

Для строительства электростанций достаточной мощности, преобразующих энергию солнца и ветра, тоже требуются, как оказалось, огромные территории.

Что же касается ядерной энергетики, то она не сопровождается вышеперечисленными негативными явлениями. Но это вовсе не означает, что АЭС не порождают серьёзных проблем.

В настоящее время квалифицированная критика ядерной энергетики концентрируется вокруг трёх принципиальных проблем: *содействие распространению ядерного оружия, радиоактивные отходы и возможность аварий*, особенно вызванных природными катаклизмами.

Первая проблема может быть решена только в рамках мирового сообщества. Большой вклад в её решение вносит, в частности, деятельность Международного агентства по атомной энергии при ООН (МАГАТЭ), созданного в 1957 г. для контроля за нераспространением ядерного оружия и безопасным применением ядерной энергии в мирных целях.

Обезвреживание радиоактивных отходов сводится в основном к трём задачам: 1) к совершенствованию технологий с целью уменьшения образования отходов при работе реакторов; 2) к переработке отходов для их консолидации (т. е. скрепления, связывания) и уменьшения опасности от распространения в окружающей среде; 3) к надёжной изоляции отходов от биосферы и человека за счёт создания могильников разных типов.

Для выполнения поставленных задач в проектах всех АЭС предусмотрены установки для отверждения жидких отходов. Кроме того, на заводах по переработке ядерного топлива производится остекловывание отходов. Газообразные отходы подвергаются очистке.

Помимо перечисленных принимаются и многие другие меры, направленные на решение проблемы радиоактивных отходов.

И третья проблема — возможность аварии и их экологические последствия. За последнее время мир стал свидетелем двух крупных аварий. Первая произошла на Чернобыльской АЭС в 1986 г., вторая — в 2011 г. на АЭС Фукусима-1. Экологические катастрофы, связанные с этими авариями, стали причиной сворачивания программ развития атомной энергетики в отдельных странах, а остальным ещё раз напомнили о важности проблем безопасности.



- 1.** В связи с чем в середине XX в. возникла необходимость нахождения новых источников энергии? **2.** Назовите два основных преимущества АЭС перед ТЭС. Ответ обоснуйте. **3.** Назовите три принципиальные проблемы современной атомной энергетики. **4.** Приведите примеры путей решения проблем атомной энергетики.



ЗАДАНИЕ



- Подготовьте коллективный доклад-дискуссию на тему «Экологические последствия использования тепловых, атомных и гидроэлектростанций». При подготовке докладов допустимо взять за основу соответствующий материал, имеющийся в учебнике, дополнив его материалами, самостоятельно найденными содокладчиками.

§ 66

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ

Известно, что радиоактивное излучение при определённых условиях может представлять опасность для здоровья живых организмов. В чём причина негативного воздействия радиации на живые существа?

Дело в том, что α -, β - и γ -частицы, проходя через вещество, ионизируют его, выбивая электроны из молекул и атомов. Ионизация живой ткани нарушает жизнедеятельность клеток, из которых эта ткань состоит, что отрицательно сказывается на здоровье всего организма. Чем больше энергии получает человек от действующего на него потока частиц и чем меньше при этом масса человека (т. е. чем большая энергия

приходится на каждую единицу массы), тем к более серьёзным нарушениям в его организме это приведёт.

Энергию ионизирующего излучения, поглощённую облучаемым веществом (в частности, тканями организма) и рассчитанную на единицу массы, называют поглощённой дозой излучения.

Поглощённая доза излучения D равна отношению поглощённой телом энергии E к его массе m :

$$D = \frac{E}{m}.$$

В СИ единицей поглощённой дозы излучения является *грэй* (Гр).

Из этой формулы следует, что

$$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

$$D = \frac{E}{m}$$

Это означает, что *поглощённая доза излучения будет равна 1 Гр, если веществу массой 1 кг передаётся энергия излучения в 1 Дж.*

В определённых случаях (например, при облучении мягких тканей живых существ рентгеновским или γ -излучением) поглощённую дозу можно измерять в *рентгенах* (Р): 1 Гр соответствует приблизительно 100 Р.

Чем больше поглощённая доза излучения, тем больший вред (при прочих равных условиях) может нанести организму это излучение.

Но для достоверной оценки тяжести последствий, к которым может привести действие ионизирующих излучений, необходимо учитывать также, что *при одинаковой поглощённой дозе разные виды излучений вызывают разные по величине биологические эффекты.*

Биологические эффекты, вызываемые любыми ионизирующими излучениями, принято оценивать по сравнению с эффектом от рентгеновского или от γ -излучения. Например, при одной и той же поглощённой дозе биологи-

ческий эффект от действия α -излучения будет в 20 раз больше, чем от γ -излучения, от действия быстрых нейтронов эффект может быть в 10 раз больше, чем от γ -излучения, от действия β -излучения — такой же, как от γ -излучения.

В связи с этим принято говорить, что **коэффициент качества** α -излучения равен 20, вышеупомянутых быстрых нейтронов — 10, при том что коэффициент качества γ -излучения (так же как рентгеновского и β -излучения) считается равным единице. Таким образом,

коэффициент качества K показывает, во сколько раз радиационная опасность от воздействия на живой организм данного вида излучения больше, чем от воздействия γ -излучения (при одинаковых поглощённых дозах).

Для оценки биологических эффектов была введена величина, называемая **эквивалентной дозой**.

Эквивалентная доза H определяется как произведение поглощённой дозы D и коэффициента качества K :

$$H = DK$$

$$H = DK.$$

Эквивалентная доза может измеряться в тех же единицах, что и поглощённая, однако для её измерения существуют и специальные единицы.

В СИ единицей эквивалентной дозы является **зиверт (Зв)**. Применяются также дольные единицы: **миллизиверт (мЗв)**, **микрозиверт (мкЗв)** и др.

Из этой формулы следует, что для рентгеновского, γ - и β -излучений (для которых $K = 1$) 1 Зв соответствует поглощённой дозе в 1 Гр, а для всех остальных видов излучения — дозе в 1 Гр, умноженной на соответствующий данному излучению коэффициент качества.

При оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм учитывают и то, что одни части тела (органы, ткани) более чувствительны, чем другие. Например, при одинаковой эквивалентной дозе возникновение рака в лёгких более вероятно, чем в щитовидной железе. Другими словами, каждый орган и ткань имеют определённый *коэффициент радиационного риска* (для лёгких, например, он равен 0,12, а для щитовидной железы — 0,03).

Поглощённая и эквивалентная дозы зависят и от времени облучения (т. е. от времени взаимодействия излучения со средой). При прочих равных условиях эти дозы тем больше, чем больше время облучения, т. е. дозы накапливаются со временем.

Космическое излучение, радиоактивное излучение Земли и пр. создают *естественный радиационный фон*, который воздействует на человека. В результате этого в год организм человека поглощает около $2 \cdot 10^{-3}$ Гр радиоактивного излучения. Эта доза не опасна для человека. Предельно допустимая доза за год для человека равна $5 \cdot 10^{-3}$ Гр, а для работающих с источниками излучения — $5 \cdot 10^{-2}$ Гр. Полученная за короткое время доза излучения в 3—10 Гр является смертельной.

Следует знать способы защиты от радиации. Радиоактивные препараты ни в коем случае нельзя брать в руки — их берут специальными щипцами с длинными ручками.

Легче всего защититься от α -излучения, так как оно обладает низкой проникающей способностью и поэтому задерживается, например, листом бумаги, одеждой, кожей человека. В то же время α -частицы, попавшие внутрь организма (с пищей, воздухом, через открытые раны), представляют большую опасность.

β -Излучение имеет гораздо большую проникающую способность, поэтому от его воздейст-

вия труднее защититься. β -Излучение может проходить в воздухе расстояние до 5 м; оно способно проникать и в ткани организма (примерно на 1—2 см). Защитой от β -излучения может служить, например, слой алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Ещё большей проникающей способностью обладает γ -излучение, оно задерживается толстым слоем свинца или бетона. Поэтому γ -радиоактивные препараты хранят в толстостенных свинцовых контейнерах. По этой же причине в ядерных реакторах используют толстый бетонный слой, защищающий людей от γ -лучей и различных частиц (α -частиц, нейтронов, осколков деления ядер и пр.).



1. В чём причина негативного воздействия радиации на живые существа? **2.** Что называют поглощённой дозой излучения? При большей или меньшей дозе излучение наносит организму больший вред, если все остальные условия одинаковы? **3.** Одинаковый или различный по величине биологический эффект вызывают в живом организме разные виды ионизирующих излучений? Приведите примеры. **4.** Что показывает коэффициент качества излучения? Какую величину называют эквивалентной дозой излучения? **5.** Какой ещё фактор (помимо энергии, вида излучения и массы тела) следует учитывать при оценке воздействий ионизирующих излучений на живой организм? **6.** Расскажите о способах защиты от воздействия радиоактивных частиц и излучений.

§ 67

ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

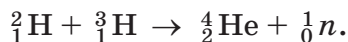
Вы уже знаете, что в середине XX в. возникла проблема поиска новых источников энергии. В связи с этим внимание учёных привлекли *термоядерные реакции*.

Термоядерной называют реакцию слияния лёгких ядер (таких как водород, гелий и др.), происходящую при температурах от десятков до сотен миллионов градусов.

Создание высокой температуры необходимо для сообщения ядрам достаточно большой кинетической энергии — только при этом условии ядра смогут преодолеть силы электрического отталкивания и сблизиться настолько, чтобы попасть в зону действия ядерных сил. На таких малых расстояниях силы ядерного притяжения значительно превосходят силы электрического отталкивания, благодаря чему возможен синтез (т. е. слияние, объединение) ядер.

В § 63 на примере урана было показано, что при делении тяжёлых ядер может выделяться энергия. В случае с лёгкими ядрами энергия может выделяться при обратном процессе — при их синтезе. Причём реакция синтеза лёгких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжёлых (если сравнивать выделившуюся энергию, приходящуюся на один нуклон).

Примером термоядерной реакции может служить слияние изотопов водорода (дейтерия и трития), в результате чего образуется гелий и излучается нейтрон:



Это первая термоядерная реакция, которую учёным удалось осуществить. Она была реализована в термоядерной бомбе и носила неуправляемый (взрывной) характер.

Как уже было отмечено, термоядерные реакции могут идти с выделением большого количества энергии. Но для того чтобы эту энергию можно было использовать в мирных целях, необходимо научиться проводить *управляемые термоядерные реакции*. Одна из основных трудностей в осуществлении таких реакций заключается в том, чтобы удержать внутри установки высокотемпературную плазму (почти полностью ионизированный газ), в которой и

происходит синтез ядер. Плазма не должна соприкасаться со стенками установки, в которой она находится, иначе стенки обратятся в пар. В настоящее время для удерживания плазмы в ограниченном пространстве на соответствующем расстоянии от стенок применяются очень сильные магнитные поля.

Термоядерные реакции играют важную роль в эволюции Вселенной, в частности в преобразованиях химических веществ в ней.

Благодаря термоядерным реакциям, протекающим в недрах Солнца, выделяется энергия, дающая жизнь обитателям Земли.

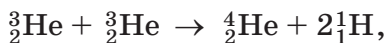
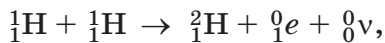
Наше Солнце излучает в пространство свет и тепло уже почти 4,6 млрд лет. Естественно, что во все времена учёных интересовал вопрос о том, что является «топливом», за счёт которого на Солнце вырабатывается огромное количество энергии в течение столь длительного времени.

На этот счёт существовали разные гипотезы. Одна из них заключалась в том, что энергия на Солнце выделяется в результате химической реакции горения. Но в этом случае, как показывают расчёты, Солнце могло бы просуществовать всего несколько тысяч лет, что противоречит действительности.

Оригинальная гипотеза была выдвинута в середине XIX в. Она состояла в том, что увеличение внутренней энергии и соответствующее повышение температуры Солнца происходит за счёт уменьшения его потенциальной энергии при гравитационном сжатии. Она тоже оказалась несостоятельной, так как в этом случае срок жизни Солнца увеличивается до миллионов лет, но не до миллиардов.

Предположение о том, что выделение энергии на Солнце происходит в результате протекания на нём термоядерных реакций, было высказано в 1939 г. американским физиком *Хансом Бете* (1906—2005).

Им же был предложен так называемый **водородный цикл**, т. е. цепочка из трёх термоядерных реакций, приводящая к образованию гелия из водорода:



где ${}^0_0\nu$ — частица, называемая «нейтрино», что в переводе с итальянского означает «маленький нейтрон».

Чтобы получились два ядра ${}^3_2\text{He}$, необходимые для третьей реакции, первые две должны произойти дважды.

Вы уже знаете, что в соответствии с формулой $E = mc^2$ с уменьшением внутренней энергии тела уменьшается и его масса.

Чтобы представить, какое колоссальное количество энергии теряет Солнце в результате превращения водорода в гелий, достаточно знать, что масса Солнца каждую секунду уменьшается на несколько миллионов тонн. Но, несмотря на потери, запасов водорода на Солнце должно хватить ещё на 5—6 млрд лет.

Такие же реакции протекают в недрах других звёзд, масса и возраст которых сравнимы с массой и возрастом Солнца.



- 1.** Какую реакцию называют термоядерной? Приведите пример реакции.
- 2.** Почему протекание термоядерных реакций возможно только при очень высоких температурах?
- 3.** Какая реакция энергетически более выгодна (в расчёте на один нуклон): синтез лёгких ядер или деление тяжёлых?
- 4.** В чём заключается одна из основных трудностей при осуществлении термоядерных реакций?
- 5.** Какова роль термоядерных реакций в существовании жизни на Земле?
- 6.** Что является источником энергии Солнца по современным представлениям?
- 7.** На какой период должно хватить запаса водорода на Солнце по подсчётам учёных?

Элементарные частицы. Античастицы

Частицы, из которых состоят атомы различных веществ — электрон, протон и нейтрон, — называли **элементарными**. Слово «элементарный» подразумевало, что эти частицы являются первичными, простейшими, далее неделимыми и неизменяемыми. Но вскоре оказалось, что эти частицы вовсе не являются неизменяемыми. Все они обладают способностью превращаться друг в друга при взаимодействии.

Поэтому в современной физике термин «элементарные частицы» обычно употребляется не в своём точном значении, а для наименования большой группы мельчайших частиц материи, не являющихся атомами или ядрами атомов (исключение составляет протон, представляющий собой ядро атома водорода).

В настоящее время известно более 350 различных элементарных частиц, разнообразных по своим свойствам. Они могут отличаться друг от друга массой, знаком и величиной электрического заряда, временем жизни (т. е. временем с момента образования частицы и до момента её превращения в какую-либо другую частицу), проникающей способностью и другими характеристиками. Большинство частиц являются «короткоживущими» — они живут не более двух миллионных долей секунды. Среднее время жизни нейтрона, находящегося вне атомного ядра, 15 мин. Электрон и протон — стабильные частицы.

Важнейшее открытие в области исследования элементарных частиц было сделано в 1932 г., когда американский физик **Карл Дейвид Андерсон** (1905—1991) обнаружил в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле, след неизвестной частицы. По характеру этого следа (по радиусу кривизны, направлению изгиба и пр.) учёные определили, что он оставлен частицей, которая представляет собой электрон с положительным по знаку электрическим зарядом. Эту частицу называли **позитроном**.

Интересно, что за год до экспериментального открытия позитрона его существование было теоретически предсказано английским физиком **Полем Дираком** (1902—1984) (существование именно такой частицы следовало из выведенного им уравнения). Более того, Дирак предсказал процессы **аннигиляции** (исчезновения) и **рождения электрон-позитронной пары**. При аннигиляции электрон и позитрон при встрече исчезают, превращаясь в γ -кванты (фотоны). А при столкновении γ -кванта с массивным ядром происходит рождение электрон-позитронной пары.

Оба эти процесса впервые удалось пронаблюдать на опыте в 1933 г. Опыт по наблюдению рождения электрон-позитронной пары проводился в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле. На рисунке 190 показаны треки электрона и позитрона, образовавшихся в результате столкно-

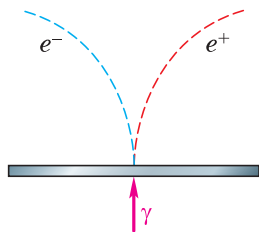


Рис. 190. Треки электрон-позитронной пары в магнитном поле

вения γ -кванта с атомом свинца при прохождении γ -лучей сквозь свинцовую пластинку. Одинаковая кривизна треков свидетельствует об одинаковой массе частиц, а искривление в разные стороны — о противоположных знаках электрического заряда.

В 1955 г. была обнаружена ещё одна античастица — **антипротон**, а несколько позже — **антинейтрон**. Антинейтрон не имеет электрического заряда и участвует в процессе аннигиляции и рождения пары нейтрон—антинейтрон.

Возможность получения античастиц привела учёных к идее о создании **антивещества**. Атомы антивещества должны быть построены таким образом: в центре атома — отрицательно заряженное ядро, состоящее из антипротонов и антинейтронов, а вокруг ядра обращаются позитроны. В целом атом нейтрален. В 1969 г. на ускорителе протонов в г. Серпухове советские физики получили ядра атомов антигелия.

В настоящее время экспериментально обнаружены античастицы почти всех известных элементарных частиц.

ИТОГИ ГЛАВЫ

ОБСУДИМ? Иван и Фёдор обсуждали, из каких веществ состоит организм человека. Иван утверждал, что в состав организма входит в том числе и множество металлов, причём отсутствие или недостаток того или иного металла приводит к тяжёлым поражениям различных органов. Информацию об этом он почерпнул из курса анатомии человека. Фёдор же заметил, что радиоактивные вещества, в том числе металлы, нанесут организму большой урон.

Правы ли ребята? При ответе вы можете использовать следующую информацию (размещена в статье журнала «Квант»): «У мужчин и женщин есть присущая им естественная радиоактивность. Радиоактивный изотоп калия содержится в их организмах в разном количестве, поэтому уровень естественной радиоактивности различен в организме мужчины и женщины».

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

«Негативное воздействие радиации (ионизирующих излучений) на живые организмы и способы защиты от неё» (возможная форма: презентация, реферат, макет).

В состав Солнечной системы входит Солнце, вокруг которого обращаются восемь *больших планет*. В порядке удаления от Солнца они располагаются в такой последовательности: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун (рис. 191). Вокруг всех планет, кроме Меркурия и Венеры, обращаются их естественные спутники.

Ещё пять планет — Церера, Плутон, Хаумеа, Макемаке и Эрида, массы и размеры которых существенно меньше, чем у больших планет, — составляют группу *планет-карликов*. Церера расположена между орбитами Марса и Юпитера, орбиты четырёх последних планет-карликов пролегают за орбитой Нептуна.

Кроме планет вокруг Солнца движутся так называемые *малые тела Солнечной системы*: астероиды, кометы, метеорные тела.



Рис. 191. Расположение больших планет с их спутниками и планет-карликов в порядке их удаления от Солнца: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Церера, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон, Хаумеа, Макемаке, Эрида

Благодаря тому, что масса Солнца составляет почти 99,9% от всей массы Солнечной системы, силы гравитационного притяжения между Солнцем и перечисленными небесными телами оказываются достаточными для удержания последних в Солнечной системе.

Согласно общепринятой в настоящее время гипотезе, формирование Солнечной системы началось около 5 млрд лет назад с гравитационного коллапса (т. е. катастрофически быстрого сжатия) небольшой части гигантского межзвёздного газопылевого облака. В общих чертах этот процесс можно описать следующим образом. Во вращающемся газопылевом облаке в результате взаимодействия его частиц или под действием каких-либо внешних влияний могло возникнуть уплотнение, ставшее центром гравитационного притяжения частиц окружающего вещества и вызвавшее гравитационный коллапс.

В процессе гравитационного сжатия размеры газопылевого облака уменьшались. Из-за вращения облака его сжатие в направлении, параллельном оси вращения, происходило бы-

стрее, чем в направлениях, перпендикулярных оси. Это приводило к уплощению облака и формированию характерного диска (рис. 192). При сжатии облака его плотность увеличивалась, движение частиц вещества становилось всё более интенсивным, особенно в центральной части диска. Как следствие увеличивалась внутренняя энергия и повышалась температура вещества. При температуре в несколько тысяч градусов атомы центральной части облака стали излучать свет, что свидетельствовало о возникновении *протозвезды* — звезды в стадии образования.

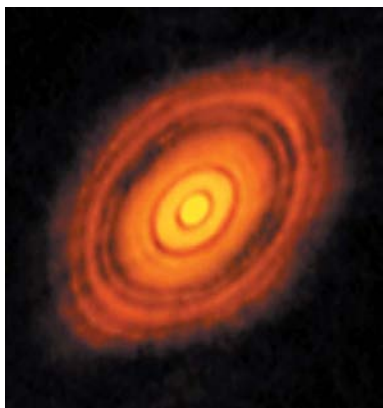


Рис. 192. Диск газопылевого облака, из которого сформировались планеты

Под действием гравитационного притяжения вещество облака продолжало падать на протозвезду, увеличивая давление и температуру в центре.

Когда температура в центре протозвезды достигла миллионов градусов, в центральной области началась термоядерная реакция превращения водорода в гелий, происходящая с выделением энергии. Протозвезда превратилась в обычную звезду, впоследствии названную Солнцем. Во внешней области диска крупные сгущения образовали планеты.

В протопланетном пылевом облаке температура прилегавшей к Солнцу области была более высокой, чем в окраинных его частях, из-за чего лёгкие химические элементы выносились в удалённые, холодные части облака. В результате в составе ближайших к Солнцу планет, названных впоследствии планетами земной группы, преобладают тяжёлые элементы, а четыре дальние — планеты-гиганты — состоят в основном из газов. Различия в составе вещества, образовавшего планеты, принадлежащие к разным группам, явились причиной различий их физических характеристик.

Планеты земной группы обладают существенно меньшими размерами и массами, но большей плотностью. Они получают от Солнца больше света и тепла, быстрее движутся по орбитам (вследствие того, что внутренняя часть протопланетного диска вращалась быстрее внешней), гораздо медленнее вращаются вокруг своей оси и поэтому меньше сжаты у полюсов, чем планеты-гиганты. Планеты-гиганты имеют значительно большие размеры атмосферы и магнитосферы¹, у них нет твёрдой или

¹ *Магнитосфера* — область околопланетного пространства, физические свойства которой определяются магнитным полем планеты и его взаимодействием с потоками заряженных частиц космического происхождения.

жидкой поверхности. Число естественных спутников у планет этой группы велико: 164 из 167 известных в Солнечной системе. Кроме того, у планет-гигантов есть образования из мелких частиц — *кольца*, которые отсутствуют у планет земной группы.

Кольца планет-гигантов образовались из остатков околопланетного облака, представляющих собой частицы разных размеров.



1. Какие группы объектов входят в Солнечную систему? **2.** В какие виды энергии переходила гравитационная энергия сжатия протооблака при образовании Солнечной системы? **3.** Чем отличаются планеты земной группы от планет-гигантов? Чем эти отличия обусловлены?



Почему планеты Солнечной системы не покидают её; не падают на Солнце?

§ 69

БОЛЬШИЕ ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Напомним, что атмосфера *Земли* — это внешняя газовая оболочка, которая начинается у её поверхности и простирается в космическое пространство приблизительно на 2000 км.

Атмосфера имеет очень большое экологическое значение. Она защищает все живые организмы Земли от губительного влияния космических излучений и ударов метеоритов, регулирует сезонные температурные колебания, уравнивает и выравнивает суточные. Если бы атмосферы не существовало, то колебание суточной температуры на Земле достигло бы $\pm 200^\circ\text{C}$.

Атмосферу условно разделяют на несколько слоёв (рис. 193). Это связано с характерными особенностями изменения температуры в каждом слое.

Нижнюю часть атмосферы, достигающую высоты 8—10 км в полярных областях и 16—



Рис. 193. Строение атмосферы Земли

18 км в экваториальной, называют **тропо-сферой**. В ней сосредоточено $\frac{4}{5}$ всей массы атмосферного воздуха. Для дыхания пригоден только её нижний, достаточно плотный слой толщиной до 5 км. В направлении от поверхности Земли к верхней границе тропосферы, т. е. при удалении от нагретой Солнцем и излучающей тепло Земли, температура воздуха понижается.

Облака образуются в основном в пределах тропосферы, так как в ней содержится почти весь водяной пар атмосферы. В тропосфере протекают процессы, определяющие погоду, например формируются и перемещаются циклоны и антициклоны.

Над тропосферой лежит **стратосфера** — очень важная для жизни на Земле часть атмосферы. Именно в ней располагается озоновый слой, поглощающий идущее от Солнца сильное ультрафиолетовое излучение. В больших количествах оно представляет опасность для здоровья и жизни. Поглощая ультрафиолетовое излучение, озон нагревает стратосферу, благодаря чему её температура возрастает с высотой.

За стратосферой следует **мезосфера** (что в переводе с греческого означает «средняя, промежуточная сфера»). Над мезосферой до высоты порядка 800 км простирается **термосфера**. В ней до высоты 200—300 км температура растёт, достигая 1000—1500 °С вследствие ионизации атмосферного кислорода и других газов ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами Солнца и космическим излучением. Области, где происходит ионизация, называют **ионосферой**. Благодаря наличию заряженных частиц, ионосфера отражает радиоволны коротковолнового диапазона и тем самым даёт возможность принимать радиопередачи с больших расстояний.

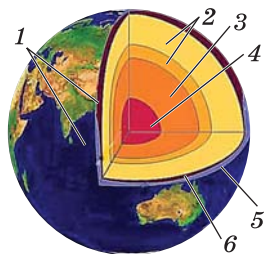


Рис. 194. Внутреннее строение Земли:
 1 — континентальная кора; 2 — мантия (верхняя и нижняя);
 3 — внешнее ядро;
 4 — внутреннее ядро;
 5 — океан;
 6 — океаническая кора

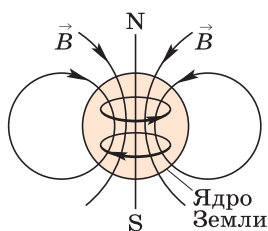


Рис. 195. Линии индукции магнитного поля Земли

Внутреннее строение Земли показано на рисунке 194. Верхняя твёрдая оболочка Земли называется **корой**. Толщина земной коры в разных местах различна. В центральной части планеты находится железоникелевое ядро, температура и давление которого могут достигать соответственно $7000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $3,6 \cdot 10^6$ атм. Внешняя часть ядра жидкая, внутренняя — твёрдая. Часть Земли, расположенную непосредственно под корой и выше ядра, называют **мантией**. В мантии находится большая часть вещества Земли.

Исследования показали, что упругие поперечные волны распространяются в глубь Земли только до глубины 2920 км. Очевидно, здесь начинается внешнее жидкое ядро.

С существованием жидкого внешнего ядра связывают происхождение магнитного поля Земли. Движение электропроводящего вещества в жидком горячем (порядка $10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$) ядре планеты возбуждает электрические токи, порождающие магнитное поле (рис. 195).

Земля обладает самым сильным магнитным полем по сравнению с другими планетами земной группы. Магнитное поле Земли время от времени изменяет свою ориентацию, совершая и вековые колебания с периодом несколько сотен лет. Кроме того, 2—3 раза за миллион лет поле меняет местами магнитные полюсы. На это указывает «вмороженное» в осадочные и вулканические породы магнитное поле отдалённых эпох.

Меркурий. Чем больше масса планеты и чем меньше при этом её радиус, тем более сильное гравитационное поле она создаёт в пространстве вокруг себя и тем больше ускорение свободного падения на её поверхности, поскольку $g = \frac{GM}{R^2}$. Обладая достаточно сильным гравитационным полем, планета может удерживать вокруг себя атмосферу.

Наличие атмосферы и её плотность определяется ещё одним фактором — расстоянием планеты от Солнца и соответственно температурой на её поверхности. При очень высоких температурах скорости движения и кинетические энергии молекул газов в атмосфере достигают таких значений, при которых они могут преодолеть силы гравитационного притяжения к планете и покинуть её атмосферу.

По изложенным выше причинам предполагалось, что Меркурий, близкий к Солнцу и имеющий небольшую массу, не имеет атмосферы. Тем не менее атмосфера, хоть и очень разреженная, была обнаружена на планете американской автоматической межпланетной станцией (АМС) «Маринер-10», которая в марте 1974 г. прошла всего в 705 км от его поверхности.

Результаты проведённых «Маринером» исследований удивили учёных тем, что в атмосфере Меркурия помимо прочих газов был обнаружен гелий. Из-за очень высоких температур (порядка 420—450 °C) весь гелий должен был бы улечься из атмосферы планеты в космическое пространство в течение примерно 200 дней. Вероятно, Меркурий постоянно получает гелий, который поставляет ему *солнечный ветер* — поток из электронов, протонов и ядер гелия, истекающий из солнечной короны.

Исследования, проведённые «Маринером-10» в 1974—1975 гг., показали, что Меркурий имеет очень слабое (в 100 раз слабее земного) магнитное поле.

Меркурий является одной из наиболее плотных планет Солнечной системы. Это обусловлено двумя факторами: образованием Меркурия из ближайшей к Солнцу части протопланетного диска, содержащей больше тяжёлых элементов, чем окраинные его части, и наличием очень плотного (9,8 г/см³) ядра, содержащего 80% массы планеты.

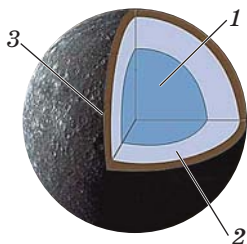


Рис. 196. Внутреннее строение Меркурия:
1 — ядро;
2 — мантия;
3 — кора

Внутреннее строение Меркурия показано на рисунке 196. Он состоит из внешнего жидкого и внутреннего твёрдого ядра. Магнитное поле Меркурия создаётся электропроводящими конвективными потоками в жидком ядре.

Над ядром Меркурия лежит силикатная оболочка — мантия толщиной 600 км. Третьей оболочкой твёрдого Меркурия является его кора, толщина которой 100—300 км.

Существование атмосферы у *Венеры* было обнаружено в 1761 г. М. В. Ломоносовым при наблюдении в зрительную трубу прохождения её по диску Солнца. В дальнейшем выяснилось, что поверхность Венеры скрывают чрезвычайно густые облака серной кислоты, хорошо отражающие свет. Это не даёт возможности наблюдать поверхность планеты в видимом диапазоне. Поэтому изучение поверхности Венеры стало возможным только после возникновения и развития в 30-х гг. XX в. радиолокационных наблюдений (радиоволны свободно проходят сквозь венерианскую атмосферу).

Первым исследовательским аппаратом, направленным землянами к другой планете, стала советская автоматическая станция «Венера-1», стартовавшая 12 февраля 1961 г.

Дальнейшие исследования Венеры с использованием советских АМС «Венера» и американских «Вояджер» и «Пионер» показали, что давление на Венере достигает 93 атм, а температура — 500 °С. Такие высокие значения температуры и давления обусловлены в атмосфере Венеры *парниковым эффектом*, способствующим аккумуляции тепла в нижних слоях атмосферы. Было выяснено также, что на высоте 50—70 км от поверхности, где располагаются плотные облака, дуют ураганные ветры. Таким образом, Венера — это планета ядовитых облаков, бурь и адской жары.

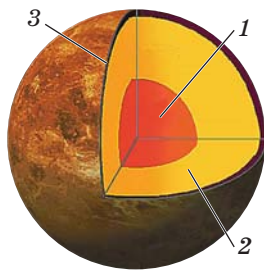


Рис. 197. Внутреннее строение Венеры:

- 1 — ядро;
- 2 — мантия;
- 3 — кора

Согласно одной из гипотез о строении Венеры, эта планета состоит из коры, мантии и расплавленного железного ядра, масса которого составляет около четверти всей массы планеты (рис. 197).

Собственное *магнитное поле* Венеры почти полностью отсутствует. Видимо, это связано с очень медленным её вращением. Магнитное поле возникает благодаря тому, что межпланетное магнитное поле возбуждает в ионосфере Венеры электрические токи, порождающие локальные магнитные поля. Влияние на эти поля солнечного ветра усложняет картину. Поэтому у Венеры нет магнитных полюсов в традиционном их понимании.

Марс. Фототелевизионные изображения марсианской поверхности, переданные на Землю в 1976 г. с американских орбитально-посадочных станций «Викинг-1» и «Викинг-2», показали, что поверхность Марса покрыта красноватым песком. Такой оттенок придаёт песку оксид железа. Проведённые этими же станциями исследования марсианского грунта на предмет обнаружения в нём следов живых микроорганизмов дали отрицательный результат.

Атмосфера Марса по плотности не превышает 1% земной, давление у поверхности в 160 раз меньше земного. В отличие от Земли, масса марсианской атмосферы сильно изменяется в течение года в связи с таянием и намерзанием полярных шапок, состоящих в основном из углекислого льда (рис. 198), и простирается в пределах от 110 до 130 км над поверхностью планеты.

Климат на Марсе значительно холоднее и суше земного.

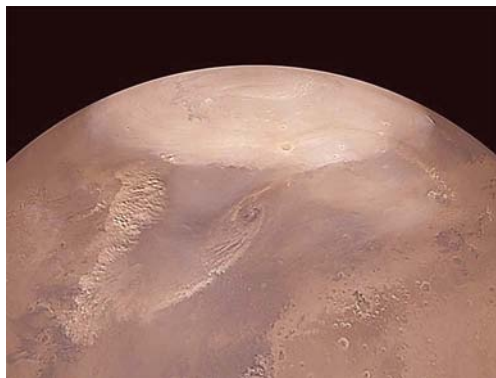


Рис. 198. Полярная шапка на Марсе

Днём в области экватора температура может составлять от -10 до -30 °С, ночью опускается ниже -100 °С. Резкие перепады температуры на Марсе (обусловленные, в частности, сильной разреженностью атмосферы) являются причиной частого возникновения на нём пылевых бурь.

Из-за низкого атмосферного давления вода не может существовать в жидком состоянии на поверхности Марса. Аппарат «Феникс» в июле 2008 г. обнаружил на Марсе воду в состоянии льда.

Марсианский год состоит из 668,6 марсианских солнечных суток (называемых *сблами*). Наклон оси обеспечивает смену времён года. При этом вытянутость орбиты приводит к большим различиям их продолжительности. Так, северная весна и лето приходятся на участок орбиты Марса, удалённый от Солнца. Поэтому на Марсе северное лето долгое и прохладное, а южное — короткое и жаркое.

Магнитное поле Марса очень слабо и неустойчиво. В различных точках планеты его индукция может отличаться от 1,5 до 2 раз. Магнитные полюсы не совпадают с географическими. Это говорит о том, что железное ядро Марса находится в сравнительной неподвижности по отношению к его коре.

Юпитер — крупнейшая планета Солнечной системы и среди газовых гигантов. Масса Юпитера превышает массу всех других планет, вместе взятых. Он находится в 5 раз дальше от Солнца, чем Земля. Один оборот вокруг Солнца Юпитер совершает за 12 лет.

Планета не имеет твёрдой поверхности. Поэтому, говоря о её размерах, указывают радиус верхней границы облаков, где давление порядка 10 кПа. Средняя плотность Юпитера очень мала ($1,33$ г/см³). Он почти целиком состоит из водорода и гелия: по объёму соответственно 89 и 10%. И только 1% составляют более тяжёлые элементы.



Рис. 199. Пояса, зоны и Большое Красное Пятно Юпитера

Протяжённость водородно-гелиевой атмосферы Юпитера превышает 1000 км. Она создаёт такое большое давление, что молекулярный водород и гелий под ней превращаются в жидкость. Оранжевый цвет атмосфере придают соединения фосфора или серы.

Из-за непрозрачности атмосферы Юпитера невозможно увидеть её нижние слои. В юпитерианской атмосфере образуются вихри (циклоны и антициклоны), штормы и грозы. Вихри проявляют себя в виде крупных красных, белых и коричневых пятен. Так называемое ***Большое Красное Пятно*** — крупнейший известный

вихрь в Солнечной системе является антициклоном (рис. 199). В пределах этого вихря могло бы разместиться несколько планет размером с Землю. Он существует уже около 300 лет.

Поскольку Юпитер является газовой планетой, его вращение отличается от вращения твёрдого тела. Экваториальная область планеты вращается быстрее приполярных. Ось вращения планеты почти перпендикулярна плоскости орбиты и эклиптики. Поэтому на Юпитере нет смены времён года.

Видимая поверхность Юпитера — это верхние плотные аммиачные облака. Глядя с Земли на Юпитер, мы видим верхушки облаков в виде вытянутых вдоль экватора полос. На рисунке 199 показано, что эти полосы образуют системы тёмных поясов и светлых зон, расположенных симметрично к северу и югу от экватора. Пояса и зоны — это области нисходящих и восходящих потоков в атмосфере планеты.

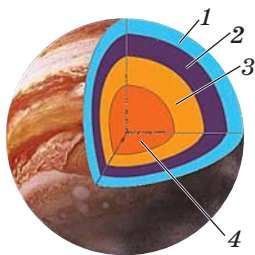


Рис. 200. Внутреннее строение Юпитера:
1 — газообразный водород;
2 — жидкий водород;
3 — металлический водород;
4 — твёрдое ядро

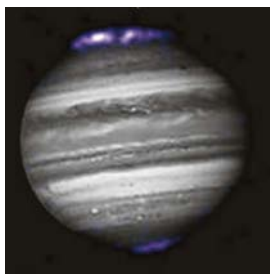


Рис. 201. Северные и южные полярные сияния на Юпитере

Предполагаемое строение Юпитера показано на рисунке 200. На глубине 10 000 км давление достигает 300 ГПа, температура — 11 000 °С, и водород переходит в вырожденное, или металлическое, состояние (при котором электроны оторваны от протонов), т. е. становится подобным жидкому металлу. Толщина этого слоя около 42 000 км. Внутри него плавают небольшое железосиликатное твёрдое ядро радиусом 4000 км с температурой, близкой 30 000 °С, и массой, в 13 раз превышающей массу земного шара.

Слой металлического водорода способен проводить электрический ток и, по всей видимости, является источником существования обширного магнитного поля планеты.

Юпитер обладает самым протяжённым магнитным полем и самой мощной и активной магнитосферой из всех планет Солнечной системы. В магнитосфере происходит ускорение частиц. Проникновение частиц из магнитосферы в атмосферу Юпитера создаёт там полярные сияния, зарегистрированные космическими аппаратами (рис. 201).

Сатурн можно увидеть невооружённым глазом с Земли. Его кольцо — самое мощное, светлое и красивое по сравнению с кольцами трёх остальных планет-гигантов — состоит из двух колец, разделённых чётко видимым зазором.

В период с 1979 по 1981 г. с помощью американских космических аппаратов «Пионер-11», «Вояджер-1» и «Вояджер-2» было обнаружено магнитное поле Сатурна. Были также получены снимки структуры колец и определён их состав. Оказалось, что кольца состоят главным образом из частичек льда, «горных пород» и пыли.

Сатурн состоит в основном из водорода с примесями гелия и следами воды, метана, аммиака и «горных пород».

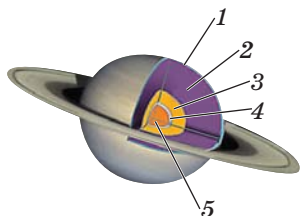


Рис. 202. Строение Сатурна:

- 1 — газовая атмосфера;
- 2 — жидкий водород;
- 3 — металлический водород;
- 4 — вода, метан, аммиак;
- 5 — ядро из кремния и металлов

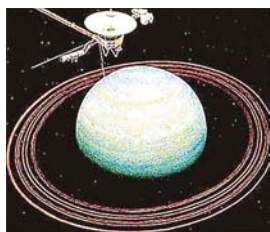


Рис. 203. «Вояджер-2» — аппарат, исследовавший Уран с близкого расстояния

Сатурн — единственная планета Солнечной системы, средняя плотность которой меньше плотности воды. Сутки на планете длятся 10 ч 34 мин 13 с. Один оборот вокруг Солнца Сатурн совершает за 29,46 земных лет, в его году 10 759 сатурнианских суток.

Плоскость экватора Сатурна (с которой совпадает плоскость обращения его колец) наклонена к плоскости его орбиты на $26,73^\circ$, поэтому на нём, как и на Земле, происходит смена времён года. Но каждое из четырёх времён года на Сатурне длится не менее 7 лет.

На рисунке 202 показано строение Сатурна.

Уран. В 1986 г. космический аппарат «Вояджер-2» пересёк орбиту Урана и прошёл в 81 500 км от поверхности планеты (рис. 203). Это единственное в истории космонавтики посещение окрестностей Урана. Аппарат изучил уникальные погодные условия, обусловленные тем, что ось вращения Урана расположена почти в плоскости его орбиты, открыл 10 новых спутников и два кольца и провёл ряд других исследований.

Период вращения планеты вокруг своей оси составляет 17 земных часов и 34 земных минуты, однако из-за сильных ветров, дующих в верхнем слое атмосферы и достигающих скорости 240 м/с, некоторые части атмосферы совершают оборот вокруг планеты за 14 часов. Двигаясь по орбите со средней скоростью, равной 6,81 км/с, Уран делает оборот вокруг Солнца за 84 земных года.

Уран является единственной планетой Солнечной системы, которая вращается «лёжа на боку», поскольку ось его вращения располагается почти в плоскости орбиты. Поэтому процессы смены дня и ночи на нём существенно отличаются от тех же процессов, происходящих на многих других планетах. За урановый год каждый полюс планеты половину года

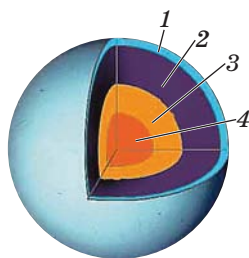


Рис. 204. Строение Урана:

1 — газовая атмосфера;
2 — жидкий водород;
3 — льды из воды, метана, аммиака;
4 — ядро



Рис. 205. Кольца Нептуна

(42 земных) находится в темноте, а другую половину — под светом Солнца.

Хотя Уран и не имеет твёрдой поверхности в привычном понимании этого слова, наиболее удалённую часть газообразной оболочки принято называть его атмосферой. Это самая холодная планетарная атмосфера Солнечной системы с минимальной температурой -224°C . Полагают, что Уран имеет сложную слоистую структуру облаков, где вода составляет нижний слой, а метан — верхний.

В недрах Урана (и схожего с ним Нептуна) отсутствует металлический водород, но зато есть разные льды: водный, метановый, аммиачный. Поэтому их называют «ледяными гигантами», в отличие от газовых гигантов — Сатурна и Юпитера, состоящих в основном из водорода и гелия.

В центре Урана (рис. 204) находится небольшое (около 20% от радиуса планеты) каменное ядро, в середине — оболочка из льда (около 60% от радиуса Урана), а вокруг водородно-гелиевая атмосфера (20% радиуса планеты).

Измерения «Вояджера-2» позволили обнаружить у Урана весьма специфическое магнитное поле, которое направлено не из геометрического центра планеты, а наклонено на 59° относительно оси вращения. Из-за асимметричности магнитного поля значения магнитной индукции на поверхности в южном и северном полушариях различны. Магнитное поле превосходит земное в 50 раз. Кроме Урана, аналогичное смещённое магнитное поле наблюдается у Нептуна. Возможно, такая конфигурация поля характерна для «ледяных гигантов» и обусловлена тем, что поле у них формируется на довольно малых глубинах.

Нептун. «Вояджер-2» был первым космическим кораблём, который в 1989 г. достиг Нептуна. Он сфотографировал планету, и благодаря этим изображениям было обнаружено, что у планеты есть пять колец (рис. 205).



Рис. 206. Большое Тёмное Пятно Нептуна

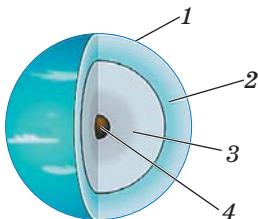


Рис. 207. Строение Нептуна:
1 — верхняя атмосфера, верхние облака;
2 — атмосфера;
3 — мантия;
4 — ядро

Видимая поверхность Нептуна представляет собой плотный облачный слой синего цвета с полосами и белыми и тёмными пятнами. Большое Тёмное Пятно (рис. 206) является самым крупным из наблюдавшихся до сих пор ураганов-антициклонов.

Температура Нептуна в верхних слоях атмосферы близка к -220°C . В центре Нептуна температура составляет, по различным оценкам, от 6000 до 7000 $^{\circ}\text{C}$, что сопоставимо с температурой на поверхности Солнца. Внутреннее строение Нептуна показано на рисунке 207.

Из-за огромного давления (в несколько миллионов раз превышающего атмосферное давление на Земле) находящийся в мантии лёд не испаряется, несмотря на высокую температуру — от 2500 до 5500 $^{\circ}\text{C}$.

Своим синим с зеленоватым оттенком цветом Нептун обязан присутствующему в верхних слоях атмосферы метану, который поглощает из солнечного света красные лучи и отражает синие.

В глубоких частях атмосферы под действием большого давления газы преобразуются в кристаллы, которые на ещё больших глубинах превращаются в лёд.

Смена времён года на Нептуне, как и на Земле, происходит по мере движения планеты вдоль орбиты. Но год на Нептуне равен 164 земным годам. Соответственно продолжительность каждого из четырёх его сезонов — 41 год — гораздо длиннее земных. Очередное лето, начавшееся в южном полушарии в 2005 г., продлится до 2046 г. В этот период вокруг северного полюса Нептуна будет царить зимняя полярная ночь.

Магнитное поле у Нептуна впервые было обнаружено в 1989 г. во время пролёта близ планеты «Вояджера-2». Исследования показали, что магнитная ось планеты отклонена на 47° от оси вращения планеты. Из-за сильного накло-

на магнитной оси сияния на Нептуне располагаются вовсе не над его полюсами, а на удалении от них на $40\text{--}50^\circ$, поэтому их уже нельзя назвать полярными.



1. Что нового вы узнали об атмосфере, строении, магнитном поле Земли? **2.** Чем могут быть вызваны проблемы с дыханием у здорового человека, поднимающегося на воздушном шаре? **3.** Высота тропосферы в полярных областях Земли достигает 10 км, а в экваториальной — 16—18 км. Как бы вы объяснили это различие, используя знания по физике? **4.** По каким двум причинам атмосфера Меркурия крайне разрежена? **5.** Чем отличается магнитное поле Юпитера от магнитного поля Земли? **6.** Что такое металлический водород? **7.** В чём заключаются особенности магнитных полей Урана и Нептуна?



УПРАЖНЕНИЕ 54

- 1.** Что является причиной смены времён года на Земле? Есть ли смена времён года на других планетах?
- 2.** Считая известными массу Солнца и радиус орбиты планеты (орбиты планет Солнечной системы близки к круговым), получите выражения для определения орбитальной скорости и центростремительного ускорения планеты. Вычислите значения этих величин для Венеры. Значения массы Солнца и среднего радиуса венерианской орбиты найдите в Интернете.

§ 70

МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Помимо больших планет и планет-карликов вокруг Солнца движется более четырёхсот тысяч малых небесных тел размером от километра и более, называемых **астероидами**, что в переводе с греческого означает «звездоподобные». Отличить астероиды от звёзд можно только по их движению на фоне звёздного неба. Совокупность обращающихся вокруг Солнца астероидов, орбиты которых пролегают в основном в пространстве между орбитами Марса и Юпитера, принято называть **Главным поясом астероидов**.

Вокруг Солнца также обращаются по вытянутым эллиптическим орбитам **кометы** и **метеорные тела** (называемые также **метеороидами**), т. е. твёрдые тела различных размеров —

от песчинки до мелкого астероида. Астероиды, кометы и метеорные тела называют *малыми телами Солнечной системы*.

Кометы представляют собой большие образования из разреженного газа с очень маленьким твёрдым ядром. Ядро состоит из льдов: водного (более 80%), метанового, аммиачного, углекислого и др. Кометный лёд перемешан с пылью и каменистым веществом.

Вдали от Солнца при температуре порядка $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ комета не имеет ни головы, ни хвоста. При приближении к Солнцу на такое расстояние, при котором температура кометы повышается до $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$, льды начинают испаряться, образуя прозрачную атмосферу — голову кометы (рис. 208).

При испарении льдов на поверхности ядра остаётся корка, состоящая из пыли и других частиц.

Кванты солнечного света, налетая на голову кометы, ионизируют молекулы газов. Солнечный ветер, действуя своим магнитным полем на ионы, уносит их от Солнца со скоростью 500—1000 км/с, в результате чего у кометы образуется длинный и прямой плазменный хвост.

Солнечный свет (поток световых квантов) оказывает давление на пылинки, благодаря чему у кометы образуется второй хвост — пылевой. Поскольку световое давление сравнительно невелико, пыль покидает голову кометы довольно медленно и, следуя за ней по криволинейной траектории, принимает изогнутую форму (рис. 209).

Название «комета» происходит от греческого слова *komētēs*, т. е. «длинноволосый». Вероятно, такое название было дано благодаря наличию головы и развевающегося за ней хвоста.



Рис. 208. Комета Холмса, открыта 6 ноября 1892 г.

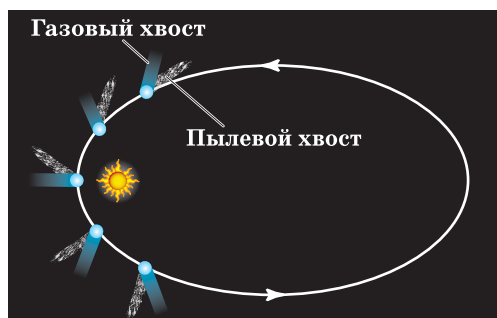


Рис. 209. Схема образования двух типов хвостов кометы

При подходе кометы близко к Солнцу (например, при её движении внутри земной орбиты), из-за сильного разогрева газ и пыль вырываются из ядра непрерывно и с такой большой скоростью, что его масса может уменьшаться на 30—40 т в секунду. Помимо этого в комете могут происходить взрывы, приводящие к разрушению ядра.

Остатки распавшегося кометного ядра, названные метеорными телами, могут растянуться вдоль орбиты кометы на большое расстояние. Если Земля проходит сквозь их скопление, они, влетая в её атмосферу со скоростью 11 км/с, испаряются на высоте в несколько десятков километров. Иногда кажется, что метеоры вылетают из какой-либо области небесной сферы (рис. 210). Область небесной сферы, кажущуюся источником метеоров, называют **радиантом**.

Если из межпланетного пространства в атмосферу проникает крупное железное или каменное метеорное тело, например обломок астероида массой в несколько килограммов, то в большинстве случаев оно не успевает разрушиться в атмосфере и падает на землю. Такое тело называют **метеоритом**.

Бывает, что крупное метеорное тело на большой скорости проникает в нижние слои атмосферы. От трения о воздух оно сильно нагревается, и у него появляется оболочка из раскалённых газов и частиц. Выглядит это как летящий по небу большой огненный шар, оставляющий позади себя яркий след. Такое явление называется **болидом** (рис. 211). Именно это явление наблюдалось 15 февраля 2013 г. в Челябинской области. Падение метеорита, один из наиболее крупных осколков которого можно увидеть в Челябинском краеведческом музее, произошло в районе озера Чебаркуль.



Рис. 210. Явление метеора



Рис. 211. Болид над Латвией



1. Что называют астероидом?
2. Что вы знаете о кометах?
3. Что называют явлением метеора?
4. Что такое метеорит?

Звёзды¹ представляют собой шары из горячего, по большей части ионизированного газа. Ионизация звёздного вещества является следствием его высокой температуры (от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч градусов).

В результате исследования химического состава Солнца и других звёзд было обнаружено, что в них присутствуют почти все химические элементы, имеющиеся на Земле и представленные в таблице Д. И. Менделеева. Выяснилось также, что в большинстве случаев 70% массы звезды составляет водород, 28% — гелий и 2% — более тяжёлые элементы.

Вы уже знаете, что чем больше масса звезды, тем более сильное гравитационное поле она создаёт. Благодаря действию гравитационных сил, сжимающих звёздное вещество, его температура, плотность, давление значительно возрастают от внешних слоёв к центру.

Так, например, температура внешних слоёв Солнца приблизительно равна $6 \cdot 10^3$ °С, а в центре — порядка 14—15 млн °С, плотность вещества в центре Солнца приблизительно равна 150 г/см³ (в 19 раз больше, чем у железа), а давление от средних слоёв к центру возрастает от $7 \cdot 10^8$ до $3,4 \cdot 10^{11}$ атм. При таких температурах и давлениях в ядре могут протекать термоядерные реакции, являющиеся источником энергии звёзд.

Мощность излучения звезды (называют также *светимостью* и обозначают буквой L) пропорциональна четвёртой степени её массы:

$$L \sim M^4.$$

¹ Под звёздами здесь и далее подразумеваются звёзды типа Солнца, находящиеся на той же стадии развития, что и Солнце.

Протекающие в недрах звёзд термоядерные реакции являются одним из процессов, существенно отличающих звёзды от планет, так как внутренний источник обогрева планет — это радиоактивный распад. Указанное различие обусловлено тем, что масса любой звезды заведомо больше массы даже самой большой планеты. Это можно проиллюстрировать на примере Юпитера. Несмотря на то что по многим параметрам он очень похож на звезду, его масса оказалась недостаточной для возникновения в его недрах условий, необходимых для протекания термоядерных реакций.

В результате термоядерных реакций в недрах Солнца выделяется огромная энергия, поддерживающая его свечение. Рассмотрим, каким образом эта энергия выходит наружу, к поверхности Солнца.

В зоне *переноса лучистой энергии* (рис. 212) освобождённое в ядре тепло распространяется от центра к поверхности Солнца путём излучения, т. е. через поглощение и излучение веществом порций света — квантов. Поскольку кванты излучаются атомами в любых направлениях, их путь к поверхности длится тысячи лет.

В *зоне конвекции* энергия переносится к поверхности всплывающими потоками горячего газа. Достигнув поверхности, газ, излучая энергию, охлаждается, уплотняется и погружается к основанию зоны. В конвективной зоне газ непрозрачен. Поэтому можно увидеть только те слои, которые находятся над ней: фотосферу, хромосферу и корону (на рисунке не обозначена). Эти три слоя относятся к солнечной атмосфере.

Фотосфера («сфера света») на фотографиях выглядит как совокупность ярких пятны-



Рис. 212. Строение Солнца

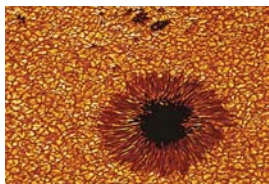


Рис. 213. Гранулы и пятно в фотосфере Солнца



Рис. 214. Солнечная корона (во время полного солнечного затмения 1999 г.)

шек — гранул (рис. 213), разделённых тонкими тёмными линиями. Яркие пятнышки — это потоки горячего газа, всплывающие на поверхность конвективной зоны.

Хромосфера («сфера цвета») названа так за свою красновато-фиолетовую окраску. Одним из наиболее интересных явлений, которые можно наблюдать в хромосфере, являются *протуберанцы*¹. Протяжённость хромосферы достигает 10—15 тыс. км.

Самая внешняя часть атмосферы Солнца — **корона**. Она простирается на миллионы километров (т. е. на расстояние порядка нескольких солнечных радиусов), несмотря на то что сила тяжести на Солнце очень велика. Большая протяжённость короны объясняется тем, что движения атомов и электронов в короне, разогретой до температуры 1—2 млн °С, происходят с огромными скоростями. Солнечная корона хорошо видна во время солнечного затмения (рис. 214). Форма и яркость короны меняются в соответствии с циклом солнечной активности, т. е. с периодичностью в 11 лет.

Индукция магнитного поля на Солнце всего в 2 раза больше, чем на поверхности Земли. Но временами в небольшой области солнечной атмосферы возникают концентрированные магнитные поля, в несколько тысяч раз более сильные, чем на Земле. Они препятствуют подъёму горячей плазмы, в результате чего вместо светлых гранул образуется тёмная область — *солнечное пятно* (см. рис. 213). При появлении больших групп пятен мощность видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучений резко возрастает, что может неблагоприятно отражаться на самочувствии людей.

Перемещение пятен по диску Солнца является следствием его вращения, которое проис-

¹ *Протуберанцы* — громадные, протяжённостью до сотен тысяч километров, плазменные образования в солнечной короне, имеющие большую плотность и меньшую температуру, чем окружающая их плазма короны.

ходит с периодом, равным 25,4 сут относительно звёзд.

Завершающий этап процесса эволюции звёзд включает несколько стадий. Когда в центре звезды весь водород превращается в гелий, структура звезды начинает заметно меняться. Её светимость растёт, температура поверхности понижается, внешние слои расширяются, а внутренние сжимаются. Звезда становится *красным гигантом*, т. е. звездой огромного размера с высокой светимостью и очень малой плотностью. В центре образуется плотное и горячее гелиевое ядро. Когда температура в нём достигает 100 млн °С, начинается реакция превращения гелия в углерод, сопровождающаяся выделением большого количества энергии.

На следующей стадии звёзды типа Солнца сбрасывают часть вещества, сжимаются до размеров планет, превращаясь в маленькие, очень плотные звёзды — *белые карлики*, и медленно остывают.



1. При температуре в ядре порядка 14—15 млн °С и давлениях от $7 \cdot 10^8$ до $3,4 \cdot 10^{11}$ атм звезда должна была бы превратиться в расширяющееся газовое облако. Но этого не происходит. Как вы думаете, какие силы противодействуют расширению звезды? **2.** Что является источником энергии, излучаемой звездой? **3.** Какой физический процесс является источником внутреннего обогрева планеты? **4.** Что является причиной образования пятен на Солнце? **5.** Из каких слоёв состоит солнечная атмосфера? **6.** Расскажите об основных стадиях эволюции Солнца.

§ 72

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Звёзды во Вселенной объединены в гигантские звёздные системы, называемые *галактиками*. Звёздную систему, в составе которой находится наше Солнце, называют *Галактикой* (или *Млечным Путём*, поскольку слово «галактикос» в переводе с греческого означает «млечный, молочный»).



Рис. 215. Галактика (вид с ребра)



ЭДВИН ПАУЭЛЛ ХАББЛ

(1889—1953)

Американский астроном. Основные труды посвящены изучению галактик. Обнаружил смещение спектральных линий в длинноволновую область в спектрах далёких галактик

Число звёзд в Галактике порядка 10^{12} . Светлая серебристая полоса звёзд, опоясывающая всё небо, которую мы называем Млечным Путём, представляет собой основную часть нашей Галактики, по форме напоминающую линзу или чечевицу (рис. 215). Диаметр Галактики приблизительно равен $30\,000\text{ пк}^1$ или почти $100\,000$ световых лет².

Галактика не имеет чётких границ — по краям звёздная плотность постепенно сходит на нет. В центре Галактики расположено ядро диаметром $1000\text{—}2000\text{ пк}$ — гигантское уплотнённое скопление звёзд. Масса Галактики приблизительно равна $2 \cdot 10^{11}$ масс Солнца.

Помимо звёзд, планет и малых тел, имеющих в некоторых звёздных системах, в состав Галактики входит ещё рассеянная материя — межзвёздный газ, пыль, излучаемые звёздами заряженные частицы. Масса рассеянной материи составляет $\frac{1}{1000}$ часть массы Галактики.

По классификации, проведённой американским астрономом *Эдвином Хабблом*, существует три вида галактик: *эллиптические, спиральные и неправильные*. Наша Галактика является спиральной (рис. 216). Солнечная система расположена между двумя спиральными ветвями, где количество звёзд сравнительно невелико.

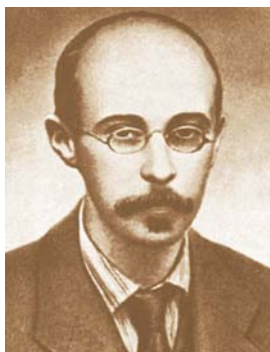
Большинство галактик сосредоточено в скоплениях. Всю систему скоплений галактик (из которых нам

¹ *Парсек* (пк) — это такое расстояние, с которого средний радиус земной орбиты (равный 1 а. е.), перпендикулярный лучу зрения, виден под углом в одну угловую секунду ($1''$), $1\text{ пк} = 206\,265\text{ а. е.} = 3,26\text{ св. года} = 3,09 \cdot 10^{16}\text{ м.}$

² *Световой год* (св. год) — расстояние, пройденное светом в течение года.



Рис. 216. Млечный Путь — спиральная галактика



АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ ФРИДМАН

(1888—1925)

Российский математик, физик и геофизик. Создатель первых научно обоснованных моделей Вселенной, предсказал расширение Вселенной

пока известна только их часть) называют **Метагалактикой**.

Для выяснения прошлого и будущего наблюдаемой Вселенной важное значение имеет создание теоретических моделей изучаемого объекта. Первые научно обоснованные модели Вселенной были созданы российским физиком **Александром Александровичем Фридманом**. Для ответа на важные космологические вопросы, например о стационарности или нестационарности Вселенной, о её форме, радиусе кривизны и многие другие, он воспользовался созданной Эйнштейном в 1916 г. общей теорией относительности (теорией всемирного тяготения).

В 1922 г. Фридман проанализировал систему из десяти сложнейших уравнений теории относительности и пришёл к фундаментальному выводу о том, что ни при каких условиях их решение не может быть единственным. Это означает, что общая теория относительности не даёт *одного* определённого ответа на поставленные вопросы. Тем не менее Фридман понял, как можно получить ответ (хоть и неоднозначный) на вопрос, что может представлять собой Вселенная с точки зрения общей теории относительности. Он нашёл новые, вполне определённые решения уравнений общей теории относительности в виде трёх возможных моделей нестационарной Вселенной. Две из

них описывали монотонно расширяющуюся Вселенную (с монотонно растущим радиусом кривизны), а третья — периодическую Вселенную (радиус кривизны её пространства сначала возрастал от нуля до некоторой величины, после чего уменьшался до нуля).

Из этих моделей следует вывод о том, что Вселенная не может оставаться постоянной, она должна расширяться или сжиматься под действием гравитационных сил.

Во времена Фридмана о движении галактик ничего не было известно. Но в 1929 г. Хаббл, наблюдая спектры далёких галактик с помощью телескопа с большим разрешением, обнаружил, что спектральные линии смещены в длинноволновую область, т. е. в сторону красных линий. В соответствии с *эффектом Доплера*¹ это означало, что расстояние между наблюдателем с Земли и галактиками увеличивалось, а частота исследуемого излучения уменьшалась. Более того, сопоставив расстояния до галактик и величину смещения в их спектрах, Хаббл открыл следующий закон (названный впоследствии его именем):

скорости удаления галактик пропорциональны расстоянию до них.

$$v = HR,$$

где v — скорость движения галактики относительно наблюдателя, R — расстояние до неё, $H = 72 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}$ — *постоянная Хаббла*.

$$v = HR$$

По смещению спектральных линий можно определять не только скорости галактик, но и расстояния до них.

Данный закон следовал из моделей Фридмана, описывающих расширяющуюся Вселенную. Поэтому можно сказать, что возможность расширения Вселенной была теоретически предсказана до открытия закона Хаббла.

По современным представлениям, наблюдаемая Вселенная возникла около 14 млрд лет

¹ *Эффект Доплера* — изменение частоты принимаемых волн при относительном движении источника и наблюдателя (приёмника волн). При их сближении частота увеличивается, а при удалении друг от друга — уменьшается. Эффект Доплера наблюдается как для звуковых, так и для электромагнитных волн. Назван в честь австрийского физика *Христиана Доплера* (1803—1853), теоретически обосновавшего этот эффект в 1842 г.

назад в результате Большого взрыва и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается.



1. Что называется световым годом? **2.** Какой вывод следовал из моделей Вселенной, полученных А. А. Фридманом? **3.** Кто, когда и каким образом экспериментально подтвердил факт расширения Вселенной?



1. Как вам известно, перемещение пятен по диску Солнца является следствием его вращения вокруг своей оси. Предложите основанный на эффекте Доплера способ доказать вращение Солнца.

2. Используя закон Хаббла, оцените время, которое прошло с момента начала расширения Вселенной.



ЗАДАНИЕ

1. Определите центростремительное ускорение Ио при его обращении вокруг Юпитера. Необходимые для решения задачи данные найдите самостоятельно.



2. Используя дополнительную литературу и ресурсы Интернета, подготовьте доклад на тему «Планеты-карлики в Солнечной системе».



№ 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ БЕЗ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Цель работы Определить ускорение движения бруска по наклонной плоскости и его мгновенную скорость в конце заданного пути.

Оборудование Прибор для изучения движения тел, штатив с муфтой и лапкой.

Теоретические обоснования

При равноускоренном движении без начальной скорости пройденное расстояние определяется по формуле:

$$s = \frac{at^2}{2},$$

отсюда

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

Зная ускорение, можно определить мгновенную скорость по формуле:

$$v = at.$$

Описание устройства и действия прибора

Прибор для изучения движения тел (рис. 217) состоит из направляющей 1 длиной 60—70 см; бруска 2 с пусковым магнитом 3, закреплённым на торце алюминиевого стержня; электронного секундомера 4 с двумя датчиками 5. Направляющая закрепляется в лапке штатива 6, под неё

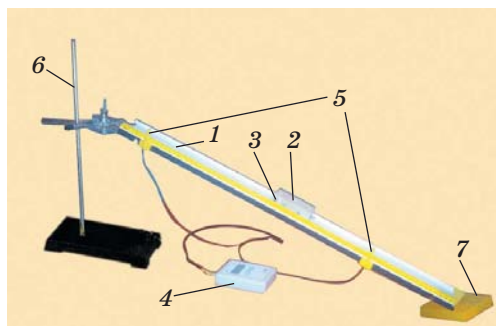


Рис. 217

подкладывается коврик 7 из пористого пластика.

При прохождении пускового магнита мимо первого датчика отсчёт времени включается, а при прохождении второго — выключается, и на экране секундомера фиксируется значение промежутка времени t , за который брусок проходит расстояние s между датчиками.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Соберите установку по рисунку 217. Направляющую закрепите в лапке штатива под углом $\approx 30\text{—}40^\circ$ к плоскости столешницы.
2. Прочтите инструкцию на тыльной стороне секундомера по его включению и выключению. Включите секундомер.
3. Разместите брусок на направляющей так, чтобы его пусковой магнит находился на 1,5 см выше верхнего датчика.
4. Отпустите брусок. Определите расстояние s между датчиками и промежуток времени t , за который брусок прошёл это расстояние.
5. Не меняя расположения датчиков, проведите опыт ещё 2 раза.
6. По результатам трёх опытов рассчитайте среднее время движения бруска:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}.$$

7. Вычислите ускорение движения бруска и его мгновенную скорость в конце пути s по формулам:

$$a = \frac{2s}{t_{\text{ср}}^2} \text{ и } v = at_{\text{ср}}.$$

8. **Обработка результатов измерений.** Результаты всех измерений и вычислений запишите в таблицу 3.

Таблица 3

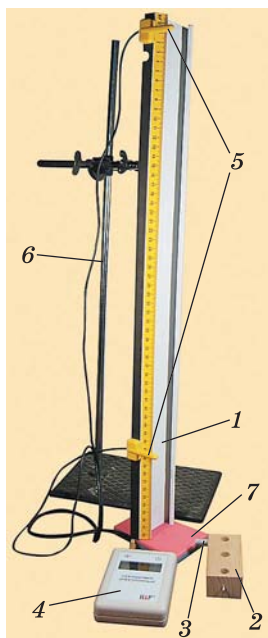
№ опыта	Время t прохождения брусом расстояния s между датчиками, с	Среднее время движения $t_{\text{ср}}$, с	Расстояние s , м	Ускорение бруска a , м/с^2	Мгновенная скорость бруска v , м/с

№ 2

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Цель работы Измерить ускорение свободного падения с помощью прибора для изучения движения тел.

Оборудование Прибор для изучения движения тел, штатив с муфтой и лапкой.



а)

Рис. 218

Описание устройства и действия прибора

Прибор для изучения движения тел (рис. 218) состоит из направляющей 1 длиной 60—70 см; бруска 2 с пусковым магнитом 3, закреплённым на торце алюминиевого стержня; электронного секундомера 4 с двумя датчиками 5.

Направляющая укрепляется вертикально в лапке штатива 6. Под рейку подкладывается коврик 7 из пористого пластика. Магнитные датчики 5 могут быть установлены в любом месте направляющей на магнитной резине, расположенной вдоль направляющей рядом со шкалой с миллиметровыми делениями. В момент прохождения пускового магнита мимо первого датчика начинается отсчёт време-



б)

ни; при прохождении второго датчика на экране секундомера высветится числовое значение промежутка времени t , за который брусок прошёл расстояние между датчиками.

Теоретические обоснования

Измерив расстояние s между установленными на направляющей датчиками времени и промежуток времени t , за который это расстояние было пройдено бруском, можно рассчитать ускорение свободного падения по формуле:

$$g = \frac{2s}{t^2}.$$

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Соберите установку по рисунку 218, *а*.
2. Прочтите инструкцию на тыльной стороне секундомера и включите его.
3. Приложите брусок к направляющей так, чтобы её пусковой магнит находился выше первого датчика времени (рис. 218, *б*).
4. Отпустите брусок. Определите промежуток времени, за который брусок проходит расстояние s между датчиками.
5. Не меняя расположения датчиков, проведите опыт ещё 4 раза. Рассчитайте среднее время движения бруска:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}.$$

6. Вычислите ускорение свободного падения по формуле:

$$g = \frac{2s}{t_{\text{ср}}^2}.$$

7. **Обработка результатов измерений.** Запишите в таблицу 4 результаты всех измерений и вычислений.
8. Определите отклонение полученного вами значения g от действительного его значения $g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$ (т. е. найдите разность между ними). Вычислите, какую часть (в %) составляет эта разность от значения g_0 .

Таблица 4

№ опыта	Время t прохождения расстояния s между датчиками, с	Среднее время движения $t_{\text{ср}}$, с	Расстояние s , м	Ускорение свободного падения g , м/с^2

Примечание: при аккуратной работе с прибором можно добиться того, чтобы отклонение от табличного значения не превышало 10%.

№ 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЁСТКОСТИ ПРУЖИНЫ

Цель работы Определить жёсткость пружины по графику зависимости $F_{\text{упр}}(x)$.

Оборудование Штатив с муфтой и лапкой, спиральная пружина, набор грузов массой 100 г каждый, линейка.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Закрепите в лапке штатива конец пружины и линейку так, чтобы пружина была параллельна линейке.
2. Определите длину пружины в ненагруженном состоянии.
3. Подвешивая к пружине последовательно один грузик, два, три, четыре груза, определите удлинение пружины $x = l - l_0$ для каждого случая.
4. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений запишите в таблицу 5 с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления линейки. Учтите, что абсолютная погрешность удлинения пружины будет складываться из погрешности определения начальной длины пружины и погрешности определения длины пружины в нагруженном состоянии. Сила упругости пружины

ны будет равна силе тяжести груза, подвешенного к пружине (тело находится в равновесии под действием двух сил, значит, эти силы равны по модулю и направлены в противоположные стороны).

Таблица 5

№ опыта	Длина ненагруженной пружины l_0 , см	Длина нагруженной пружины l , см	Удлинение x , см	Сила упругости $F_{\text{упр}}$, Н

- Используя результаты опытов, постройте график зависимости силы упругости пружины от её удлинения.

Примечание: для построения графика с учётом погрешности необходимо на координатной плоскости по оси x отметить не точки, а отрезки, соответствующие интервалу возможных значений удлинения. Прямую следует провести так, чтобы она проходила через начало координат и пересекала все построенные отрезки.

- Сделайте вывод, подтверждают ли ваши результаты справедливость закона Гука.
- Определите жёсткость пружины.

Примечание: так как зависимость линейная, $k = \operatorname{tg} \alpha$, где α — угол наклона графика к оси абсцисс.

№ 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРИОДА И ЧАСТОТЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ НИТЯНОГО МАЯТНИКА ОТ ЕГО ДЛИНЫ

Цель работы Выяснить, как зависят период и частота свободных колебаний нитяного маятника от его длины.

Оборудование Штатив с муфтой и лапкой, шарик с прикреплённой к нему нитью длиной 130 см, протянутой сквозь кусочек ре-

зины¹, часы с секундной стрелкой или секундомер сотового телефона.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

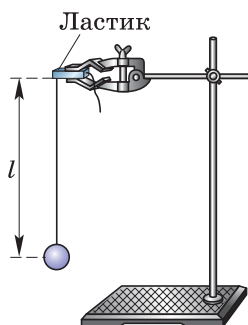


Рис. 219

1. Соберите установку по рисунку 219. При этом длина маятника должна быть равна 5 см, как указано в таблице 6 для первого опыта. Длину l маятника измеряйте от точки подвеса до середины шарика.
2. Для проведения первого опыта отклоните шарик от положения равновесия на 1—2 см (амплитуда колебаний) и отпустите. Измерьте промежуток времени t , за который маятник совершит 30 полных колебаний.
3. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления прибора (линейки и секундомера²), и вычислений записывайте в таблицу 6.

Таблица 6

№ опыта	1	2	3	4	5
Физическая величина					
l , см	5	20	45	80	125
N	30	30	30	30	30
t , с					
T , с					
ν , Гц					

¹ Кусочек резины (в данном случае ластик) используется для того, чтобы нить не выскальзывала из лапки штатива и чтобы можно было быстро и точно установить нужную длину маятника. Нить протягивается сквозь резину с помощью иголки.

² Погрешность электронного секундомера можно считать равной единице младшего разряда на дисплее. Однако имейте в виду, что точность измерения ограничена временем реакции человека, равным примерно 0,2 с.

4. Проведите остальные четыре опыта так же, как и первый. При этом длину l маятника каждый раз устанавливайте в соответствии с её значением, указанным в таблице 6 для данного опыта.

Указание: при выполнении п. 4 штатив следует ставить на край стола, чтобы колебания маятника происходили над полом.

5. Для каждого опыта вычислите значение периода T колебаний маятника.
6. Для каждого опыта рассчитайте значения частоты ν колебаний маятника по формуле: $\nu = \frac{1}{T}$ или $\nu = \frac{N}{t}$.
7. Сделайте выводы о том, как зависят период и частота свободных колебаний маятника от его длины.

Дополнительное задание

Цель задания Выяснить, какая математическая зависимость существует между длиной маятника и периодом его колебаний.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Пользуясь данными таблицы 6, вычислите отношения периодов и длин (при вычислении отношений периодов округляйте результаты до целых чисел).
2. **Обработка результатов измерений.** Результаты вычислений запишите в таблицу 7.

Таблица 7

$\frac{T_2}{T_1} =$	$\frac{T_3}{T_1} =$	$\frac{T_4}{T_1} =$	$\frac{T_5}{T_1} =$
$\frac{l_2}{l_1} =$	$\frac{l_3}{l_1} =$	$\frac{l_4}{l_1} =$	$\frac{l_5}{l_1} =$

3. Сравните результаты всех четырёх столбцов таблицы 7 и постарайтесь найти в них общую закономерность. На основании этого выберите из пяти приведённых ниже равенств те, которые верно отражают зависимость между периодом колебаний маятника T и его длиной l :

$$1) \frac{T_k}{T_1} = \frac{l_k}{l_1}; \quad 3) \frac{T_k}{T_1} = \sqrt{\frac{l_k}{l_1}}; \quad 5) \left(\frac{T_k}{T_1}\right)^2 = \frac{l_k}{l_1},$$

$$2) \frac{T_k}{T_1} = \frac{l_1}{l_k}; \quad 4) \sqrt{\frac{T_k}{T_1}} = \frac{l_k}{l_1};$$

где k может принимать следующие значения: 2, 3, 4, 5;

например, $\left(\frac{T_3}{T_1}\right)^2 = \frac{l_3}{l_1}$.

№ 5

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Цель работы Изучить явление электромагнитной индукции.

Оборудование Миллиамперметр, катушка-моток, магнит дугообразный, источник питания, катушка с железным сердечником от разборного электромагнита, реостат, ключ, провода соединительные, модель генератора электрического тока (одна на класс).

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

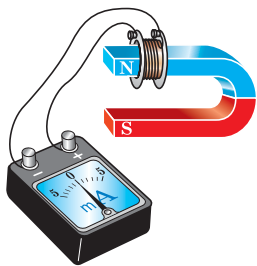


Рис. 220

1. Подключите катушку-моток к зажимам миллиамперметра.
2. Наблюдая за показаниями миллиамперметра, подводите один из полюсов магнита к катушке, потом на несколько секунд остановите магнит, а затем вновь приближайте его к катушке, вдвигая в неё (рис. 220). Запишите, возникал ли в катушке индукционный ток во время движения магнита относительно катушки; во время его остановки.
3. Запишите, менялся ли магнитный поток Φ , пронизывающий катушку, во время движения магнита; во время его остановки.
4. На основании ваших ответов на предыдущий вопрос сделайте и запишите вывод о том, при каком условии в катушке возникал индукционный ток.

5. Почему при приближении магнита к катушке магнитный поток, пронизывающий эту катушку, менялся? (Для ответа на этот вопрос вспомните, во-первых, от каких величин зависит магнитный поток Φ и, во-вторых, одинаков ли модуль вектора индукции \vec{B} магнитного поля постоянного магнита вблизи этого магнита и вдали от него.)
6. О направлении тока в катушке можно судить по тому, в какую сторону от нулевого деления отклоняется стрелка миллиамперметра.
Проверьте, одинаковым или различным будет направление индукционного тока в катушке при приближении к ней и удалении от неё одного и того же полюса магнита.
7. Приближайте полюс магнита к катушке с такой скоростью, чтобы стрелка миллиамперметра отклонялась не более чем на половину предельного значения его шкалы. Повторите тот же опыт, но при большей скорости движения магнита, чем в первом случае.
При большей или меньшей скорости движения магнита относительно катушки магнитный поток Φ , пронизывающий эту катушку, менялся быстрее?
При быстром или медленном изменении магнитного потока сквозь катушку сила тока в ней была больше?
На основании вашего ответа на последний вопрос сделайте и запишите вывод о том, как зависит модуль силы индукционного тока, возникающего в катушке, от скорости изменения магнитного потока Φ , пронизывающего эту катушку.
8. Соберите установку для опыта по рисунку 221.
9. Проверьте, возникает ли в катушке-мотке 1 индукционный ток в следующих случаях:
 - а) при замыкании и размыкании цепи, в которую включена катушка 2;
 - б) при протекании через катушку 2 постоянного тока;
 - в) при увеличении и уменьшении силы тока, протекающего через катушку 2, путём перемещения в соответствующую сторону движка реостата.
10. В каких из перечисленных в пункте 9 случаев меняется магнитный поток, пронизывающий катушку 1? Почему он меняется?

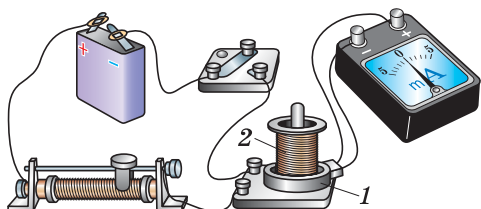


Рис. 221

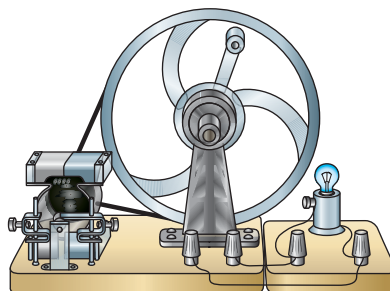


Рис. 222

11. Пронаблюдайте возникновение электрического тока в модели генератора (рис. 222). Объясните, почему в рамке, вращающейся в магнитном поле, возникает индукционный ток.

№ 6

НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ

Цель работы Наблюдать сплошной спектр от источника света, линейчатые спектры от разряда в разреженных газах.

Оборудование общее для всего класса Проекционный аппарат, раздвижная щель, набор спектральных трубок (например, с водородом, кислородом и неоновом) с источником питания (рис. 223), плоскопараллельная пластина со скошенными гранями или однотрубный спектроскоп (для каждого ученика).



Рис. 223

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Расположите стеклянную пластину горизонтально перед глазом. Сквозь скошенные грани пластины, образующие угол 45° , наблюдайте спектр света выбранного источника (лампа, солнечный свет).
2. Запишите, какой вид спектра вы наблюдаете, сколько в нём основных цветов и в какой последовательности они расположены.
3. Пронаблюдайте спектр того же источника, рассматривая свет сквозь скошенные грани пластины, образующие

угол 60° . Запишите, чем этот спектр отличается от предыдущего. Сделайте и запишите вывод о зависимости протяжённости спектра от преломляющего угла призмы, в которой преломляется пучок белого света.

4. При наличии однотрубного спектроסקопа пронаблюдайте спектр через него. Отличается ли спектр, полученный с помощью спектроסקопа, от спектров, полученных с помощью плоскопараллельной пластины?
5. Пронаблюдайте через скошенные грани пластины или через однотрубный спектроскоп спектры, полученные от светящихся газоразрядных трубок. Какой вид спектров вы наблюдали? Нарисуйте в тетрадах примерный вид спектра от разряда в каждом из газов.

№ 7

ИЗМЕРЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО РАДИАЦИОННОГО ФОНА ДОЗИМЕТРОМ

(выполняется коллективно под руководством учителя)

Цель работы Измерить мощность дозы радиоактивного фона бытовым дозиметром.

Оборудование Дозиметр «Сосна» (рис. 224).



Рис. 224

Используемые термины

Фон радиоактивный — естественный радиационный фон, создаваемый ионизирующим излучением, источником которого являются космические лучи и так называемые естественные радионуклиды (т. е. существующие в природе ядра радиоактивных элементов).

Ионизирующее излучение — различные виды частиц и физических полей, способных ионизировать вещество.

Космические лучи представляют собой поток частиц высоких энергий, приходящих на Землю из космоса (солнечная радиация).

Естественные радионуклиды повсеместно присутствуют в окружающей среде, а также в животных и растительных организмах. Фоновому облучению подвергаются все живые организмы Земли, в том числе человек. В зависи-

мости от высоты над уровнем моря и содержания радионуклидов в окружающей среде радиационный фон колеблется в значительных пределах. Для его измерения используют счётчики Гейгера—Мюллера (см. § 59 учебника).

В бытовых дозиметрах используется счётчик жёсткого (т. е. высокоэнергетического) β - и γ -излучения, способный регистрировать мощность дозы в диапазоне 0,004—40 мкР/с (микрорентген в секунду).

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Положите дозиметр на стол и включите его.
2. Запустите отсчёт импульсов нажатием кнопки «Пуск».
3. Через 40 с подсчёт импульсов будет прекращён (перестанут мерцать точки), на экране высветится значение мощности дозы фонового излучения (в мкР/ч).

№ 8

ИЗУЧЕНИЕ ДЕЛЕНИЯ ЯДРА АТОМА УРАНА ПО ФОТОГРАФИИ ТРЕКОВ

Цель работы	Применить закон сохранения импульса для объяснения движения двух ядер, образовавшихся при делении ядра атома урана.
Оборудование	Фотография треков заряженных частиц (рис. 225), образовавшихся при делении ядра атома урана.
Пояснения	На данной фотографии вы видите треки двух осколков, образовавшихся при делении ядра атома урана, захватившего нейтрон. Ядро урана находилось в точке g , указанной стрелочкой.

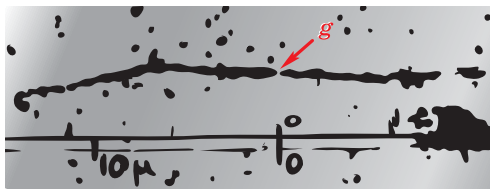


Рис. 225

По трекам видно, что осколки ядра урана разлетелись в противоположных направлениях (излом левого трека объясняется столкновением осколка с ядром одного из атомов фотоэмульсии, в которой он двигался).

Задание 1 Пользуясь законом сохранения импульса, объясните, почему осколки, образовавшиеся при делении ядра атома урана, разлетелись в противоположных направлениях.

Задание 2 Известно, что осколки ядра урана представляют собой ядра атомов двух разных химических элементов (например, бария, ксенона и др.) из середины таблицы Д. И. Менделеева.

Одна из возможных реакций деления урана может быть записана следующим образом:



где символом ${}_Z\text{X}$ обозначено ядро атома одного из химических элементов.

Пользуясь законом сохранения электрического заряда и таблицей Д. И. Менделеева, определите, что это за элемент.

№ 9

ИЗУЧЕНИЕ ТРЕКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ГОТОВЫМ ФОТОГРАФИЯМ

Цель работы Объяснить характер движения заряженных частиц.

Оборудование Фотографии треков заряженных частиц, полученных в камере Вильсона, пузырьковой камере и фотоэмульсии.

Пояснения При выполнении данной лабораторной работы следует помнить, что:

а) длина трека тем больше, чем больше энергия частицы и чем меньше плотность среды;

б) толщина трека тем больше, чем больше заряд частицы и чем меньше её скорость;

в) при движении заряженной частицы в магнитном поле трек её получается искривлённым, причём радиус кривизны трека тем больше, чем больше масса и скорость частицы и чем меньше её заряд и модуль индукции магнитного поля;

г) частица двигалась от конца трека с большим радиусом кривизны к концу с меньшим радиусом кривизны (радиус

кривизны по мере движения уменьшается, так как из-за сопротивления среды уменьшается скорость частицы).

Задание 1 На двух из трёх представленных вам фотографий (рис. 226) изображены треки частиц, движущихся в магнитном поле. Укажите на каких. Ответ обоснуйте.

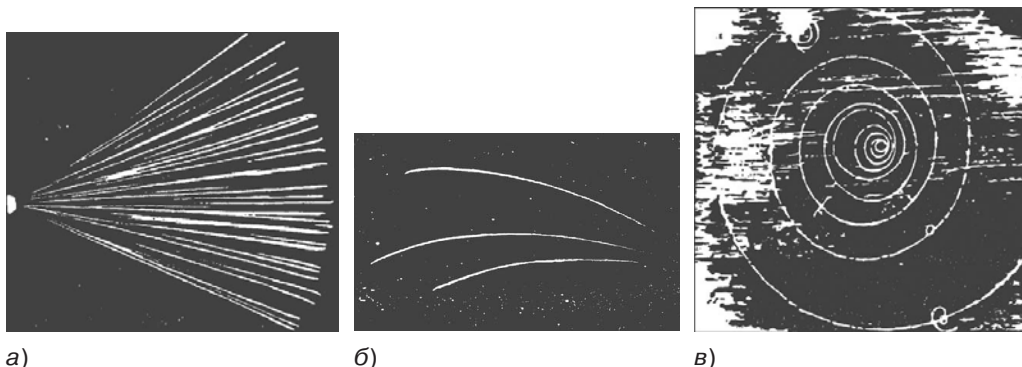


Рис. 226

Задание 2 Рассмотрите фотографию треков α -частиц, двигавшихся в камере Вильсона (рис. 226, а), и ответьте на вопросы.

- В каком направлении двигались α -частицы?
- Длина треков α -частиц примерно одинакова. О чём это говорит?
- Как менялась толщина трека по мере движения частиц? Что из этого следует?

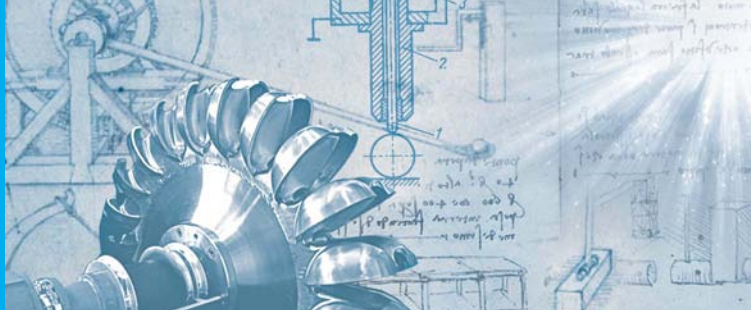
Задание 3 На рисунке 226, б дана фотография треков α -частиц в камере Вильсона, находившейся в магнитном поле. Определите по этой фотографии:

- почему менялись радиус кривизны и толщина треков по мере движения α -частиц;
- в какую сторону двигались частицы.

Задание 4 На рисунке 226, в дана фотография трека электрона в пузырьковой камере, находившейся в магнитном поле. Объясните, почему трек имеет форму спирали. Определите по этой фотографии:

- в каком направлении двигался электрон;
- что могло послужить причиной того, что трек электрона на рисунке 226, в гораздо длиннее треков α -частиц на рисунке 226, б.

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ



- Для каждого из векторов, изображённых на рисунке 227, определите:
 - координаты начала и конца;
 - проекции на ось y ;
 - модули проекций на ось y ;
 - модули векторов.
- На рисунке 228 векторы \vec{a} и \vec{c} перпендикулярны оси X , а векторы \vec{b} и \vec{d} параллельны ей. Выразите проекции a_x , b_x , c_x и d_x через модули этих векторов или соответствующие числа.
- На рисунке 229 изображена траектория движения шарика, переместившегося из точки A в точку B . Определите:
 - координаты начального и конечного положений шарика;
 - проекции s_x и s_y перемещения шарика;
 - модули $|s_x|$ и $|s_y|$ проекций перемещения;
 - модуль перемещения $|\vec{s}|$.

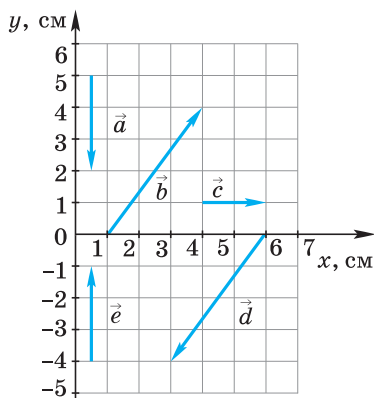


Рис. 227

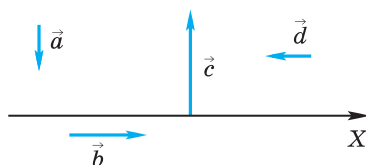


Рис. 228

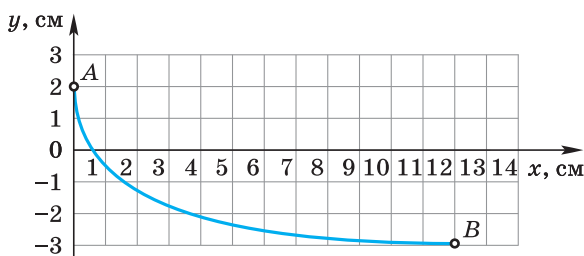


Рис. 229

4. Катер переместился относительно пристани из точки $A(-8 \text{ м}; -2 \text{ м})$ в точку $B(4 \text{ м}; 3 \text{ м})$. Сделайте чертёж, совместив начало координат с пристанью и указав на нём точки A и B . Определите перемещение катера AB . Мог ли путь, проделанный катером, быть больше совершённого им перемещения; меньше перемещения; равен перемещению? Все ответы обоснуйте.
5. Известно, что для определения координаты прямолинейно движущегося тела используется уравнение $x = x_0 + s_x$. Докажите, что координата тела при его прямолинейном равномерном движении для любого момента времени определяется с помощью уравнения $x = x_0 + v_x t$, где x_0 и v_x — постоянные величины, а t — переменная.
6. Тело движется прямолинейно со скоростью 5 м/с в положительном направлении оси X . Запишите уравнение движения тела, если в момент начала наблюдения его координата равна 3 м .
7. Два поезда — пассажирский и грузовой — движутся по параллельным путям. Относительно здания вокзала движение пассажирского локомотива описывается уравнением $x_{\text{п}} = 260 - 10t$ (м), а грузового — уравнением $x_{\text{г}} = -100 + 8t$ (м). Через какой промежуток времени от начала наблюдения локомотивы встретились? Какова координата места их встречи?

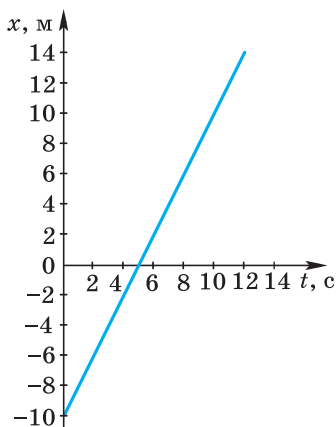


Рис. 230

8. Туристы сплавляются на плоту по реке. На рисунке 230 показано, как меняется со временем координата плота относительно места стоянки туристов (точки O). Начало наблюдения совпадает с моментом спуска плота на воду и началом движения.
- Где плот был спущен на воду: от места стоянки, выше по течению или ниже? Если выше или ниже места стоянки, то на сколько метров?
- Определите начальную координату и скорость движения плота и запишите уравнение движения плота.

9. Мальчик съезжает с горы на санках, двигаясь из состояния покоя прямолинейно и равноускоренно. За первые 2 с после начала движения его скорость возрастает до 3 м/с . Через какой промежуток времени от начала движения скорость мальчика ста-

нет равной 4,5 м/с? Какой путь он пройдёт за этот промежуток времени?

10. Приведите формулу $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}$ к виду: $\vec{s} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} \cdot t$.

11. Исходя из того, что $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ и $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$, выведите формулу $a_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2s_x}$.

12. На рисунке 31 показаны положения шарика через каждую 0,1 с его равноускоренного падения из состояния покоя. Пользуясь рисунком, определите среднюю скорость шарика за первые 0,3 с от начала движения и его мгновенную скорость, которую он приобрёл к концу этого же промежутка времени.

13. Два лифта — обычный и скоростной — одновременно приходят в движение и в течение одного и того же промежутка времени движутся равноускоренно. Во сколько раз путь, который пройдёт за это время скоростной лифт, больше пути, пройденного обычным лифтом, если его ускорение в 3 раза превышает ускорение обычного лифта? Во сколько раз бóльшую скорость по сравнению с обычным лифтом приобретёт скоростной лифт к концу этого промежутка времени?

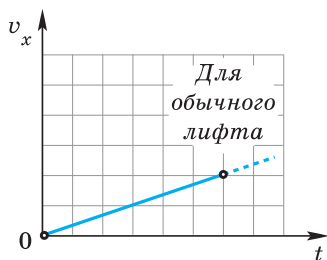


Рис. 231

14. На рисунке 231 представлен график зависимости проекции скорости лифта при разгоне от времени. Перечертите этот график в тетрадь и в тех же координатных осях постройте аналогичный график для скоростного лифта, ускорение которого в 3 раза больше, чем обычного.

15. Автомобиль движется прямолинейно вдоль оси X . Уравнение зависимости проекции вектора скорости автомобиля от времени выглядит так: $v_x = 10 + 0,5t$ (м/с). Определите модуль и направление начальной скорости и ускорения автомобиля. Как меняется модуль вектора скорости автомобиля?

16. От удара клюшкой шайба приобрела начальную скорость 5 м/с и стала скользить по льду с ускорением 1 м/с². Запишите урав-

нение зависимости проекции вектора скорости шайбы от времени и постройте соответствующий этому уравнению график.

- 17.** Известно, что для определения координаты прямолинейно движущегося тела используется уравнение $x = x_0 + s_x$. Докажите, что координата тела при его прямолинейном равноускоренном движении для любого момента времени определяется с помощью уравнения $x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$, где x_0 , v_{0x} и a_x — постоянные величины, а t — переменная.
- 18.** Лыжник скатывается с горы, двигаясь прямолинейно с постоянным ускорением $0,1 \text{ м/с}^2$. Напишите уравнения, выражающие зависимость от времени координаты и проекции вектора скорости движения лыжника, если его начальные координата и скорость равны нулю.
- 19.** Велосипедист движется по шоссе прямолинейно со скоростью, модуль которой равен 40 км/ч относительно земли. Параллельно ему движется автомобиль. Что можно сказать о модуле вектора скорости и направлении движения автомобиля относительно земли, если относительно велосипедиста модуль скорости автомобиля равен: а) 0 ; б) 10 км/ч ; в) 40 км/ч ; г) 60 км/ч ?
- 20.** Скорость катера относительно воды в реке в 5 раз больше скорости течения воды относительно берега. Рассматривая движение катера относительно берега, определите, во сколько раз быстрее катер движется по течению, чем против него.
- 21.** На тело действуют три силы, модули которых: $F_1 = 2 \text{ Н}$, $F_2 = 5 \text{ Н}$ и $F_3 = 2 \text{ Н}$. Направления действия сил показаны на рисунке 232, а. С направлением какого из векторов (рис. 232, б) совпадает направление равнодействующей сил; ускорения тела?

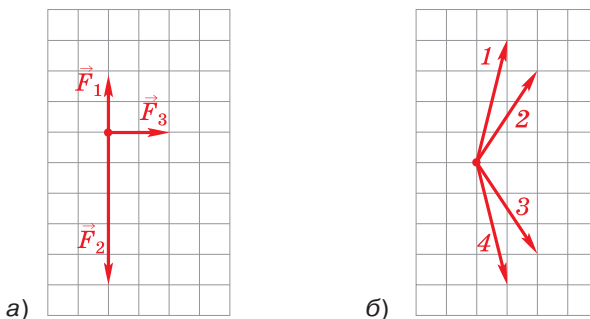


Рис. 232

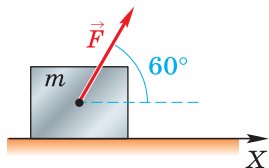


Рис. 233

22. Брусок массой $m = 200$ г движется по горизонтальной поверхности стола под действием силы $F = 2$ Н, направленной под углом 60° к горизонту (рис. 233). Чему равно ускорение бруска? Трение пренебрежимо мало.

23. Мальчик держит в руках шарик массой $3,87$ г и объёмом $3 \cdot 10^{-3}$ м³. Что произойдёт с этим шариком, если его выпустить из рук?

24. Стальной шар равномерно катится по горизонтальной поверхности и сталкивается с неподвижным алюминиевым шаром, в результате чего алюминиевый шар получает некоторое ускорение. Может ли при этом модуль ускорения стального шара быть равен нулю; быть больше или меньше ускорения алюминиевого шара? Все ответы обоснуйте.

25. Пусть M_3 и R_3 — соответственно масса и радиус земного шара, g_0 — ускорение свободного падения на поверхности Земли, а g — на высоте h . Исходя из формул $g = \frac{GM_3}{(R_3 + h)^2}$ и $g_0 = \frac{GM_3}{R_3^2}$, выведите формулу: $g = \frac{g_0 R_3^2}{(R_3 + h)^2}$.

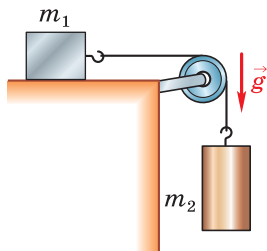


Рис. 234

26. Тело массой $m_1 = 100$ г скользит без трения по горизонтальной плоскости под действием груза массой $m_2 = 300$ г, связанного с телом нерастяжимой и невесомой нитью, перекинутой через неподвижный блок (рис. 234). С каким ускорением движется тело массой m_1 ?

27. Шайбе, находящейся на шероховатой горизонтальной плоскости, сообщают горизонтальную скорость $v_0 = 3$ м/с. Через какое время остановится шайба, если коэффициент трения шайбы о плоскость $\mu = 0,3$?

28. Имеются две абсолютно упругие пружины. К первой пружине подвешен груз массой 500 г, а ко второй — 200 г. При этом удлинения пружин оказались равными. Жёсткость какой пружины больше? Во сколько раз?

29. Мальчик стоит на напольных весах в лифте. Куда и с каким ускорением движется лифт, если весы показывают 33 кг? Известно, что в покое веса показывают 30 кг.

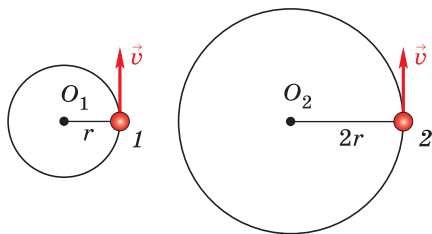


Рис. 235

30. На рисунке 235 изображены равные по массе шарики 1 и 2, привязанные к нитям длиной r и $2r$ соответственно и движущиеся по окружностям с одинаковой по модулю скоростью \vec{v} . Сравните центростремительные ускорения, с которыми движутся шарики, и силы натяжения нитей.

31. Исходя из формулы $a_{ц.с} = \frac{v^2}{r}$ для определения центростремительного ускорения при движении по окружности и формулы $g = \frac{g_0 R_3^2}{(R_3 + h)^2}$, выведенной вами при решении задачи 25, получите следующую формулу для расчёта первой космической скорости на высоте h над поверхностью Земли:

$$v = \sqrt{\frac{g_0 R_3^2}{R_3 + h}}.$$

32. Среднее значение радиуса Земли равно 6400 км, а ускорение свободного падения у земной поверхности $9,8 \text{ м/с}^2$. Пользуясь только этими данными, вычислите первую космическую скорость на высоте 3600 км над поверхностью Земли.

33. Постройте график зависимости проекции вектора скорости от времени для тела, свободно падающего в течение 4 с ($v_0 = 0$, считать $g = 10 \text{ м/с}^2$).

34. Тело массой 0,3 кг свободно падает из состояния покоя в течение 3 с. На сколько увеличивается его импульс за первую секунду падения; за вторую секунду падения?

35. С помощью графика, построенного вами при решении задачи 33, покажите, что импульс свободно падающего тела за равные промежутки времени меняется на одну и ту же величину.

36. Алюминиевый и медный шарики одинакового объёма свободно падают из состояния покоя с одной и той же высоты в течение 2,5 с. Импульс какого из шариков будет больше и во сколько раз к концу первой секунды падения; к концу второй секунды падения? Ответы обоснуйте.

37. Два одинаковых бильярдных шара, двигаясь вдоль одной прямой, сталкиваются друг с другом. Перед столкновением проек-

ция вектора скорости первого шара на ось X была равна $v_{1x} = 0,2$ м/с, а второго — $v_{2x} = 0,1$ м/с. Определите проекцию вектора скорости второго шара после столкновения, если у первого она стала равна $v'_{1x} = 0,1$ м/с.

- 38.** Решите предыдущую задачу для случая, при котором $v_{1x} = 0,2$ м/с, $v_{2x} = -0,1$ м/с, $v'_{1x} = -0,1$ м/с.
- 39.** Чему равна работа силы трения при торможении с заблокированными колёсами автомобиля массой 2 т, если скорость автомобиля уменьшилась от 72 до 36 км/ч?
- 40.** Пружина жёсткостью 500 Н/м растянута на 2 см. Какую работу нужно совершить, чтобы растянуть эту пружину дополнительно ещё на 2 см?
- 41.** Брусок массой $m = 100$ г поднимают из состояния покоя вертикально вверх с ускорением $a = 1$ м/с. Чему будет равна кинетическая энергия бруска через время $\Delta t = 4$ с? Какая работа при этом будет совершена силой тяжести?
- 42.** Груз массой 10 кг падает с высоты 10 м и проникает в мягкий грунт на глубину 20 см. Определите силу сопротивления грунта, считая её постоянной. Сопротивление воздуха не учитывать.
- 43.** Используя данные и результат решения задачи 38, покажите, что при столкновении шаров полная механическая энергия системы не изменилась.
- 44.** Тело свободно падает без начальной скорости с высоты 30 м. На какой высоте его кинетическая энергия будет вдвое меньше потенциальной? За нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии принять поверхность земли. Сопротивлением воздуха пренебречь.

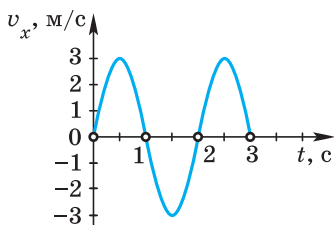


Рис. 236

- 45.** На рисунке 236 показано, как меняется с течением времени проекция вектора скорости одной из точек сидения качелей. С какой частотой происходит это изменение? Какова частота изменения скорости любой другой точки качелей, совершающей колебания?
- 46.** Струна арфы совершает гармонические колебания с частотой 40 Гц. Постройте график зависимости $x(t)$ для средней точки струны, амплитуда колебаний которой равна 3 мм.

Годится ли построенный вами график для других точек той же самой струны; для средних точек других струн арфы? Почему?

47. Увеличили или уменьшили длину маятника, если: а) период его колебаний сначала был $0,3$ с, а после изменения длины стал $0,1$ с; б) частота его колебаний вначале была равна 5 Гц, а потом уменьшилась до 3 Гц?

48. Как изменится период колебаний маятника при увеличении длины его нити в 4 раза? Из пяти приведённых ниже утверждений выберите верное.

- 1) увеличится в 4 раза
- 2) уменьшится в 4 раза
- 3) увеличится в 2 раза
- 4) уменьшится в 2 раза
- 5) увеличится в 16 раз

49. Как добиться звучания одного из двух одинаковых камертонов на резонаторных ящиках, не дотрагиваясь до него? Как при этом следует расположить отверстия резонаторных ящиков по отношению друг к другу? Ответы поясните.

Какое физическое явление лежит в основе данного опыта?

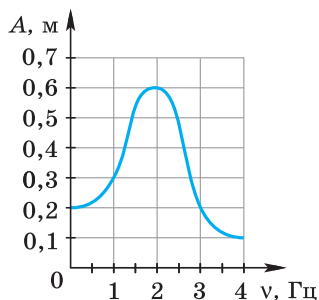


Рис. 237

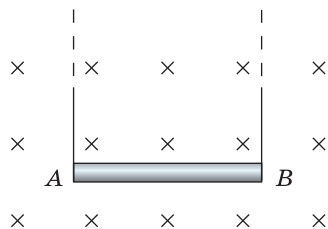


Рис. 238

50. Качели периодически подталкивают рукой, т. е. действуют на них вынуждающей силой. На рисунке 237 приведён график зависимости амплитуды установившихся колебаний качелей от частоты вынуждающей силы. Пользуясь графиком, ответьте на вопросы.

а) При какой частоте воздействия на качели — 1 Гц или 3 Гц — амплитуда их установившихся колебаний будет больше?

б) С какой частотой надо подталкивать качели, чтобы амплитуда их установившихся колебаний достигла наибольшего значения?

в) Чему равна собственная частота качелей? На основании какого физического закона вы определили собственную частоту?

51. На рисунке 238 изображён проводник АВ длиной 10 см и массой 2 г, помещённый в однородное магнитное по-

ле индукцией $4 \cdot 10^{-2}$ Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. По проводнику протекает электрический ток (подводимый по тонким проводам, на которых подвешен данный проводник). Какой должна быть сила тока, чтобы сила тяжести, действующая на проводник AB , уравновешивалась силой действия магнитного поля на ток?

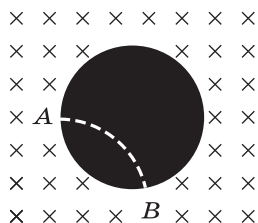


Рис. 239

52. В камеру Вильсона, помещённую в однородное магнитное поле, влетает электрон и движется по дуге окружности (белая штриховая линия на рисунке 239). Под действием какой силы меняется направление скорости электрона? В какой точке он влетел в камеру?

53. Известно, что сила F , с которой однородное магнитное поле индукцией B действует на

частицу с зарядом q , движущуюся со скоростью v перпендикулярно линиям магнитной индукции, определяется по формуле: $F = Bqv$. По дуге окружности какого радиуса будет двигаться в однородном магнитном поле электрон, если его скорость направлена перпендикулярно линиям магнитной индукции и $v = 3 \cdot 10^7$ м/с, модуль заряда $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, а индукция магнитного поля $B = 8,5 \cdot 10^{-3}$ Тл?

54. В результате какого радиоактивного распада углерод $^{14}_6\text{C}$ превращается в азот $^{14}_7\text{N}$?

55. При бомбардировке ядер алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$ нейтронами из образовавшегося ядра выбрасывается α -частица. Напишите уравнение этой реакции.

56. Пользуясь законом сохранения массового и зарядового чисел, заполните пропуск в записи следующей ядерной реакции: $^{10}_5\text{B} + \dots \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$.

57. Какой химический элемент образуется в результате α -распада изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$? Запишите эту реакцию.

58. В результате какого числа β -распадов ядро атома тория $^{234}_{90}\text{Th}$ превращается в ядро атома урана $^{238}_{92}\text{U}$?

К упражнениям

- Упр. 2. 3. 7 км; 3 км.
- Упр. 5. 2. $1,5 \text{ м/с}^2$. 3. $0,5 \text{ м/с}^2$. 4. 2 м/с^2 . 5. 5 с.
- Упр. 6. 1. 1 м/с . 2. 10 с. 5. $a_1 = 0,5 \text{ м/с}^2$; $a_2 = 1 \text{ м/с}^2$.
- Упр. 7. 1. 31,25 м. 2. 150 м. 3*. Указания: замените в формуле $S = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t$ время t его выражением, полученным из формулы для расчёта ускорения (§ 5), а площадь S — проекцией перемещения s_x ; проведите преобразования с учётом того, что $(a + b)(a - b) = a^2 - b^2$ и что $a + b = b + a$.
- Упр. 8. 1. 0,4 м; $0,8 \text{ м/с}^2$. 2. $0,06 \text{ м/с}^2$. 3. 21 с; 220 м. 4*. 7 м/с .
- Упр. 9. 2. 35 сут. 3. 5 ч 30 мин. 5*. 248 м/с при движении на восток и 198 м/с при движении на запад.
- Упр. 11. 2. $36,8 \text{ кН}$. 3. $9,6 \text{ Н}$. 4. 6 м/с^2 .
- Упр. 12. 2. Не будет. 3. а) $F_{2x} = 0,3 \text{ Н}$, $F_{1x} = -0,3 \text{ Н}$; б) $F_{1x} = 0,1 \text{ Н}$, $F_{2x} = -0,1 \text{ Н}$; г) $F_x = 0,4 \text{ Н}$.
- Упр. 13. 1. $78,4 \text{ м}$. 3. 3 с; 5 м; 25 м. 4. 25 м/с . 5. $12,5 \text{ м}$.
- Упр. 14. 1. 1 с; $4,9 \text{ м}$. 3. 15 м/с .
- Упр. 15. 1. Увеличится в 9 раз. 2. $1,67 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.
- Упр. 16. 2. Притягивается с такой же по модулю силой. 6*. $h_1 = R_3$; $h_2 = 2R_3$.
- Упр. 17. 3. 480 г. 4. $0,2 \text{ м/с}^2$. 5. $a = g/5$.
- Упр. 18. 2. 0,5. 3. 3 кг. 4. 19 м.
- Упр. 19. 3*. На участках AB и CD . Могла.
- Упр. 20. 1. $\approx 3,14 \text{ м/с}$. 3. $2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$. 5*. 3600. Секундная. 6*. а) $\approx 1,9 \cdot 10^{20} \text{ Н}$; б) $\approx 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$; в) $\approx 1 \text{ км/с}$. 7*. 22 м/с .
- Упр. 21*. 1. $6,67 \text{ км/с}$. 2. $1,7 \cdot 10^3 \text{ км}$. 3. 4685 км. 4. 2,2 м.
- Упр. 22. 1. $0,02 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$; $-0,02 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 2. $5 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 4. $0,9 \text{ м/с}$.
- Упр. 23. 1. $2,25 \text{ м/с}$. 2. $\approx 33 \text{ м/с}$.
- Упр. 24. 1. 42 Дж. 2. 180 кДж. 3. 1000 Н/м .
- Упр. 25. 3. 24 мДж . 4. 14 Дж. 5. -225 Дж .
- Упр. 26. 2. 10 м/с . 3. $1,25 \text{ м}$.
- Упр. 27. 1. а) Под действием силы упругости шнуров.
- Упр. 28. 4. 2 с; $0,5 \text{ Гц}$. 6. 40 см.
- Упр. 30. 3. 2 с.
- Упр. 31. 1. 20 м/с .
- Упр. 33. 2. Понизится.
- Упр. 34. 6. 20 м/с .
- Упр. 35. 1. Да. 2. N , M . 3. а) C и D ; б) A ; в) можно.
- Упр. 37. 1. Вправо. 2. От A к B .
- Упр. 38. 1. $0,5 \text{ Тл}$.
- Упр. 45. 1. $5 \cdot 10^5 \text{ Гц}$. 3. Нельзя.
- Упр. 50. 3. В 6 раз.
- Упр. 52. 1. Нуклонов — 9, протонов — 4, нейтронов — 5.
- Упр. 53. $\Delta t = 0,0345 \text{ а. е. м.}$ $\approx 5,73 \cdot 10^{-29} \text{ кг}$; выделяется.

К задачам для повторения

1. а) $\vec{a} : (0,5; 5), (0,5; 2)$; $\vec{b} : (1; 0), (4; 4)$; б) $a_y = -3; b_y = 4$; в) $|a_y| = 3; |b_y| = 4$;
 г) $|\vec{a}| = 3, |\vec{b}| = 5$. **2.** $a_x = 0, b_x = b$. **3.** г) $|\vec{s}| = 13$. **4.** $|\vec{s}| = 13$ м. **6.** $x = 3 + 5t$ (м).
7. $t = 20$ с. **8.** $x = -10 + 2t$ (м). **9.** $t_2 = 3$ с; $s_{2x} = 6,75$ м. **12.** $v_{\text{ср. } x} \approx 1,4$ м/с;
 $v_x \approx 2,9$ м/с. **15.** $v_0 = 10$ м/с; $a = 0,5$ м/с². **16.** $v_x = 5 - t$ (м/с). **18.** $x =$
 $= 0,05t^2$ (м); $v_x = 0,1t$ (м/с). **19.** б) $v_a = 50$ км/ч или $v_a = 30$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \uparrow \vec{v}_b$;
 г) $v_a = 100$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \uparrow \vec{v}_b$ или $v_a = 20$ км/ч, $\vec{v}_a \uparrow \downarrow \vec{v}_b$. **20.** В 1,5 раза. **21.** С на-
 правлением вектора \vec{z} . **22.** $a = 5$ м/с². **23.** Шар будет покоиться на том ме-
 сте, где его выпустили из рук. **24.** Модуль ускорения стального шара не
 может быть равен нулю. Если масса стального шара больше массы алю-
 миниевого, то ускорение стального будет меньше ускорения алюми-
 ниевого, если же масса стального меньше, то его ускорение будет больше,
 чем у алюминиевого. **26.** $a = 7,5$ м/с². **27.** $\Delta t = 1$ с. **28.** $k_1/k_2 = 2,5$. **29.** Лифт
 движется вверх с ускорением $a = 1$ м/с². **30.** $a_{\text{ц.с } 1}/a_{\text{ц.с } 2} = 2$; $F_{\text{ц.с } 1}/F_{\text{ц.с } 2} =$
 $= 2$. **32.** $v \approx 6,3$ км/с. **34.** $\Delta p_I = 2,94$ кг·м/с; $\Delta p_{II} = 2,94$ кг·м/с.
36. $p_{m1}/p_{a1} = p_{m2}/p_{a2} \approx 3,3$. **37.** $v'_{2x} = 0,2$ м/с. **39.** $A = -300$ кДж. **40.** $A =$
 $= 0,3$ Дж. **41.** $E_k = 0,8$ Дж; $A = -8$ Дж. **42.** $F = 5,1$ кН. **44.** $h = 20$ м. **45.** $\nu =$
 $= 0,5$ Гц (для любой колеблющейся точки качелей). **46.** Построенный
 график не годится ни для других точек данной струны (так как у них
 другие амплитуды колебаний), ни для средних точек других струн арфы
 (так как они колеблются с другими частотами). **50.** а) $\nu = 1$ Гц. **51.** $I = 5$ А.
53. $r = 2 \cdot 10^{-2}$ м. **54.** ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}e$. **55.** ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0n \rightarrow {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$.

А

Альфа-распад 253
Альфа-частицы 245
Амплитуда 124
Антинейтрино 269
Астероид 308
Атом 244

Б

Бета-распад 254
Бета-частицы 245

В

Водородный цикл 290
Волна 140
— бегущая 141
— поперечная 142
— продольная 141
— световая 225
— упругая 141
— электромагнитная 206
Высота звука 152

Г

Галактика 314
Гамма-частицы 245
Ган О. 272
Генератор высокочастотных электро-
магнитных колебаний 210
— переменного тока 195
Герц (единица частоты) 125
Гравитационная постоянная 63
Громкость звука 154
Грэй (единица поглощённой дозы излу-
чения) 284

Д

Движение колебательное 118
— криволинейное 80
— неравномерное 20
— периодическое 119
— по окружности 83

— поступательное 6
— равноускоренное 22
— равномерное 15
— реактивное 100
Дейтерий 267
Деление ядер 272
Детектирование 218
Детектор 217
Дефект массы 271
Джоуль (единица работы) 105
Дисперсия света 233
Дифракция волн 222
Длина волны 145
— — световой 225
Доза излучения поглощённая 284
— — эквивалентная 285

Е

Единица
— импульса 94
— ускорения 22

З

Закон всемирного тяготения 63
— Ньютона второй 48
— — первый 42
— — третий 52
— преломления света 227
— радиоактивного распада 256
— сохранения заряда 255
— — импульса 95
— — массового числа 255
— — механической энергии
114
— Хаббла 317

И

Излучение видимое 208
— инфракрасное 208
— рентгеновское 209
— ультрафиолетовое 208
Изолированные атомы 239
Изотопы 267

Импульс тела 93
Индуктивность 192
Индукция магнитного поля (магнитная индукция) 178
Интерференция волн 219
Искусственный спутник Земли 88

К

Камера Вильсона 259
— пузырьковая 261
Камертон 148
Квант 226
Колебания вынужденные 134
— гармонические 128
— затухающие 133
— звуковые 149
— инфразвуковые 150
— механические 119
— модулированные 216
— свободные 121
— ультразвуковые 150
— электромагнитные 210
Колебательный контур 210
Комета 309
Коэффициент качества (радиоактивного излучения) 285

Л

Линии магнитной индукции 180

М

Магнитный поток (поток вектора магнитной индукции) 182
Масса критическая 274
Маятник математический 130
— нитяной 122
— пружинный 122
Метеорит 310
Метод сцинтилляций 247
Модель ядра протонно-нейтронная 265
Модуляция амплитудная 217

Н

Невесомость 61
Нейтрино 290

Нейтрон 264
Нуклон 265
Ньютон (единица силы) 49

О

Обертон 153
Оптическая плотность среды 229
Опыты Резерфорда (по рассеянию α -частиц) 247
Относительность движения 37

П

Падение свободное 55
Перемещение 10
Период колебаний 119, 124
— полураспада 256
Показатель преломления абсолютный 227
— — относительный 227
Поле вихревое электрическое 203
— магнитное 166
— электромагнитное 204
Постоянная Планка 226
Постулаты Бора 252
Правило буравчика 171
— левой руки 176
— Ленца 190
— правой руки 172
— смещения
— — для α -распада 269
— — для β -распада 269
Протий 267
Протон 262

Р

Работа силы 105
Радиоактивность 245
Радиосвязь 215
Разность фаз 126
Ракета 101
Реактор ядерный 277
Реакция термоядерная 287
— цепная 273
Резонанс 137
— звуковой (акустический) 163

Резонатор 164
Рентген (единица дозы излучения) 284
Ротор 195

С

Самоиндукция 193
Сила всемирного тяготения 63
— вынуждающая 134
— консервативная 109
— трения покоя 75
— — скольжения 76
— упругости 70
Силы ядерные 268
Система единиц Международная 10
— мира гелиоцентрическая 38
— — геоцентрическая 37
— отсчёта 7
— — инерциальная 43
— — неинерциальная 43
— тел замкнутая 95
— — колебательная 122
Скорость волны 146
— вторая космическая 92
— звука 158
— мгновенная 21
— первая космическая (круговая) 90
— равномерного прямолинейного движения 15
— света 205
— электромагнитных волн 205
Спектр 233
— испускания 239
— — линейчатый 239
— — непрерывный (сплошной) 238
— поглощения 239
Спектральный анализ 241
Спектроскоп 236
Статор 195
Счётчик Гейгера 258

Т

Тело отсчёта 4
Тембр 153
Теорема об изменении кинетической энергии 112

Тесла (единица магнитной индукции) 180

Ток переменный 195

Тон основной 153

— чистый 153

Точка материальная 4

Трансформатор 198

— повышающий 199

— понижающий 199

Третий 267

У

Ускорение 22

— свободного падения 57

— центростремительное 85

Ф

Формула Томсона 214

— Эйнштейна (взаимосвязи массы и энергии) 270

Фотон 226

Ч

Частота колебаний 125

— — несущая 216

— — основная 153

— — собственная 125

— переменного тока 197

Число зарядовое 254, 266

— массовое 254, 265

Э

Электромагнитная индукция 187

Энергия кинетическая 112

— магнитного поля тока 194

— покоя 270

— потенциальная 109

— связи 269

— фотона (кванта электромагнитного излучения) 226

Эхолокация 150

Я

Ядро атомное 249

[illegible]

*Лантаноиды

***АКТИНОИДЫ

58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
Церий	140,12	140,908	Празеодим	144,24	Неодим	[145]	150,36	151,96	157,25	158,925	Тербий	Галлийний	Диспрозий	Гольмий	Эрбий	Тулий	Итербий	Лютеций	173,04	168,934	174,967	173,04	174,967	173,04	174,967	174,967	
58	Th	90	U	91	Pa	92	Np	93	Pu	94	Am	95	Cm	96	Bk	97	Cf	98	Es	99	Fm	100	Md	101	No	102	Lr
Торий	232,038	238,029	Уран	[231]	Протактиний	238,029	Нептуний	237,04	Плутоний	244	Америций	243	Кюрий	247	Берклий	247	Калифорний	251	Эйнштейний	252	Фермий	257	Менделеев	260	Нобелий	262	Лоренсий

ГЛАВА 1

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ

§ 1	Материальная точка. Система отсчёта	3
§ 2	Перемещение	9
§ 3	Определение координаты движущегося тела	11
§ 4	Перемещение при прямолинейном равномерном движении	15
§ 5	Прямолинейное равноускоренное движение. Ускорение	20
§ 6	Скорость прямолинейного равноускоренного движения. График скорости	26
§ 7	Перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении	29
§ 8	Перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости	32
§ 9	Относительность движения	35
§ 10	Инерциальные системы отсчёта. Первый закон Ньютона	40
§ 11	Второй закон Ньютона	44
§ 12	Третий закон Ньютона	51
§ 13	Свободное падение тел	55
§ 14	Движение тела, брошенного вертикально вверх. Невесомость	59
§ 15	Закон всемирного тяготения	63
§ 16	Ускорение свободного падения на Земле и других небесных телах	66
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Открытие планеты Нептун	68
§ 17	Сила упругости	69
§ 18	Сила трения	74
§ 19	Прямолинейное и криволинейное движение	80
§ 20	Движение тела по окружности с постоянной по модулю скоростью	83
* § 21	Искусственные спутники Земли	88
§ 22	Импульс тела. Закон сохранения импульса	93
§ 23	Реактивное движение. Ракеты	99
§ 24	Работа силы	104
§ 25	Потенциальная и кинетическая энергия	109
§ 26	Закон сохранения механической энергии	113
	ИТОГИ ГЛАВЫ	117

ГЛАВА 2

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ. ЗВУК

§ 27	Колебательное движение. Свободные колебания	118
§ 28	Величины, характеризующие колебательное движение	123

§ 29	Гармонические колебания	128
§ 30	Затухающие колебания. Вынужденные колебания	132
§ 31	Резонанс	136
§ 32	Распространение колебаний в среде. Волны	139
§ 33	Длина волны. Скорость распространения волн	144
§ 34	Источники звука. Звуковые колебания	147
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Инфразвук	151
§ 35	Высота, тембр и громкость звука	152
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Музыка и медицина	156
§ 36	Распространение звука. Звуковые волны	156
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Барабанный телеграф	160
§ 37	Отражение звука. Звуковой резонанс	161
	ИТОГИ ГЛАВЫ	165

ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 38	Магнитное поле	166
§ 39	Направление тока и направление линий его магнитного поля	171
§ 40	Обнаружение магнитного поля по его действию на электрический ток. Правило левой руки	173
§ 41	Индукция магнитного поля	178
§ 42	Магнитный поток	182
§ 43	Явление электромагнитной индукции	184
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Открытия Майкла Фарадея	188
§ 44	Направление индукционного тока. Правило Ленца	188
§ 45	Явление самоиндукции	191
§ 46	Получение и передача переменного электрического тока. Трансформатор	195
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Из истории электротехники	201
§ 47	Электромагнитное поле	202
§ 48	Электромагнитные волны	205
§ 49	Колебательный контур. Получение электромагнитных колебаний	210
§ 50	Принципы радиосвязи и телевидения	215
* § 51	Интерференция и дифракция света	219
§ 52	Электромагнитная природа света	224
§ 53	Преломление света. Физический смысл показателя преломления	227
§ 54	Дисперсия света. Цвета тел	231
§ 55	Типы оптических спектров	238
	ИТОГИ ГЛАВЫ	243

ГЛАВА 4**СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ ЯДЕР**

§ 56	Радиоактивность. Модели атомов	244
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Из истории открытия радиоактивности	250
§ 57	Поглощение и испускание света атомами. Происхождение линейчатых спектров	251
§ 58	Радиоактивные превращения атомных ядер. Закон радиоактивного распада	253
§ 59	Экспериментальные методы исследования частиц	258
§ 60	Открытие протона и нейтрона	262
§ 61	Состав атомного ядра. Ядерные силы	265
§ 62	Энергия связи. Дефект массы	269
§ 63	Деление ядер урана. Цепная реакция	272
§ 64	Ядерный реактор. Преобразование внутренней энергии атомных ядер в электрическую энергию	277
§ 65	Атомная энергетика	280
§ 66	Биологическое действие радиации	283
§ 67	Термоядерная реакция	287
	ЭТО ЛЮБОПЫТНО ...	
	Элементарные частицы. Античастицы	291
	ИТОГИ ГЛАВЫ	292

ГЛАВА 5**СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ**

§ 68	Состав, строение и происхождение Солнечной системы	293
§ 69	Большие планеты Солнечной системы	296
§ 70	Малые тела Солнечной системы	308
§ 71	Строение, излучения и эволюция Солнца и звёзд	311
§ 72	Строение и эволюция Вселенной	314
	ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	319
	ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ	334
	ОТВЕТЫ	343
	ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	345
	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА	348

Учебное издание

**Перышкин И. М.
Гутник Е. М.
Иванов А. И.
Петрова М. А.**

ФИЗИКА

9 класс

Учебник

Центр физики и астрономии

Ответственный за выпуск *И. Г. Власова*
Ответственный редактор *А. О. Тупикин*
Художественные редакторы *А. В. Шувалова, Ю. В. Христич*
Художественное оформление *А. В. Копалина*
Художники *О. А. Новотоцких, В. С. Давыдов, Ю. В. Христич*
Технический редактор *И. В. Грибкова*
Компьютерная вёрстка *Т. М. Дородных*
Корректор *Г. И. Мосякина*

Подписано в печать 10.12.2021. Формат 70×90/16.

Усл. печ. л. 25,74. Тираж экз. Заказ № .

Акционерное общество «Издательство «Просвещение».
Российская Федерация,
127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 3, этаж 4, помещение I.
Адрес электронной почты «Горячей линии» — vopros@prosv.ru.